

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO FASEAMENTO CONSTRUTIVO EM ESTRUTURAS PORTICADAS DE BETÃO

DIOGO SOARES ROQUE

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Miguel Ângelo Carvalho Ferraz

JUNHO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não estar depois podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais

Ao expandirmos o campo do conhecimento apenas aumentamos o horizonte da ignorância.

Henry Miller

AGRADECIMENTOS

Queria agradecer aos meus pais, que sempre marcaram presença ao longo de toda a minha vida, e que nestes meus anos académicos sempre me apoiaram e ajudaram em tudo aquilo que podiam. Sem eles nada disto seria possível.

Ao meu irmão por me ter ajudado, sempre que podia, em questões de carácter informático, nas quais revela grandes facilidades.

Aos meus amigos, por todas as vivências experimentadas ao longo destes anos de faculdade, por todas as maratonas de estudo e entreajuda nas várias matérias abordadas, e por todos os bons momentos que partilhámos. O seu apoio revelou-se fundamental, não só para a realização da presente tese mas ao longo de todo o meu percurso académico.

Ao professor doutor e orientador científico desta dissertação, Miguel Ferraz, pela simpatia demonstrada, por todas as dúvidas que teve o cuidado de me esclarecer e por todos os incentivos que sempre me tentou transmitir. Mostrou ter bom conhecimento sobre todos os temas que eu estava a trabalhar o que me ajudou bastante na realização do meu trabalho.

A todas as pessoas que contribuíram na elaboração deste trabalho e que possa ter-me esquecido de mencionar.

RESUMO

Normalmente, a análise estrutural não contempla a evolução histórica da estrutura. As propriedades do betão tais como a fluência e a retração também não são normalmente contempladas na análise de uma estrutura, apesar da sua grande influência tanto na fase de construção como na fase de exploração da mesma. Existem diversos modelos de cálculo que permitem este tipo de análises.

Neste trabalho utilizou-se um programa de análise estrutural denominado Evolution, desenvolvido pelo Professor Miguel Ferraz. Trata-se de um programa baseado em elementos finitos de viga e que contempla, entre outros, os efeitos atrás mencionados.

De forma a analisar a influência de cada um destes fatores foi efetuada uma análise paramétrica de diversas estruturas porticadas. Os resultados, maioritariamente apresentados sob forma gráfica, permitem quantificar a influência que tais fatores têm em alguns parâmetros analisados como, por exemplo, flechas, tensões ou reações.

Palavras-Chave: Modelação Numérica, Faseamento Construtivo, Reologia do Betão, Armaduras, Análises Paramétricas.

ABSTRACT

Usually, in structural analysis the historical development of a structure is not contemplated. Concrete proprieties such as creep and shrinkage normally are not contemplated in a structure analysis, despite of its great influence both during the construction and in service. There are many types of software that allow this kind of analysis.

In the present work, a structural analysis software called Evolution was used, which has been developed by Professor Miguel Ferraz. It is a program based on finite beam elements and can operate with the effects previously referred.

In order to analyse the influence of each of these factors, a parametric analysis of some structures was made. The results, for the most presented in a graphic way, can show the influence of these factors in some parameters analysed such as, for example, deflections, tensions and reactions.

KEYWORDS: Numeric Analysis, Historical Development, Concrete Proprieties, Steel, Parametric Analysis.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO	1
1.2. ESTADO DA ARTE	2
1.3. MODELAÇÃO NUMÉRICA	2
1.3.1. <i>Software em Exploração</i>	2
1.3.2. <i>Programar no Evolution</i>	3
1.3.3. <i>Potencialidades do programa</i>	4
2 PROCESSOS CONSTRUTIVOS ADMITIDOS NAS MODULAÇÕES	ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO.
2.1. NOTA INTRODUTÓRIA	7
2.2. PRÉ-DIMENSIONAMENTOS	8
2.2.1. <i>Materiais e dimensões do modelo</i>	8
2.2.2. <i>Pré-Dimensionamento da espessura a atribuir à laje</i>	9
2.2.3. <i>Classificação das ações atribuídas ao modelo</i>	10
2.2.4. <i>Pré-Dimensionamento das vigas e pilares e outras verificações</i>	13
2.2.4.1. <i>Verificações nas Lajes</i>	13
2.2.4.2. <i>Pré-Dimensionamento das vigas</i>	13
2.2.4.3. <i>Pré-Dimensionamento dos pilares</i>	14
2.3. INTRODUÇÃO DOS EFEITOS REOLÓGICOS DO BETÃO	15
2.3.1. <i>Objetivos, regulamentação e considerações</i>	15
2.3.2. <i>Cálculo das Armaduras</i>	16
2.3.2.1. <i>Definição dos recobrimentos</i>	17
2.3.2.2. <i>Armaduras nas vigas</i>	18
2.3.2.2. <i>Armaduras nos pilares</i>	22
2.3.2.3. <i>Armaduras nas lajes</i>	24
3 GRÁFICOS COMPARATIVOS DE MODELOS COM OU SEM ANÁLISE INCREMENTAL	25
3.1. NOTA INTRODUTÓRIA	25
3.1.1. <i>Objetivos</i>	25
3.1.2. <i>Modelos em análise</i>	25
3.1.3. <i>Esforços em análise</i>	27
3.2. ANÁLISES PARAMÉTRICAS	29
3.2.1. <i>Introdução</i>	29
3.2.2. <i>Reações nos apoios</i>	30
3.2.3. <i>Deslocamentos dos pontos intermédios das vigas</i>	31
3.2.4. <i>Tensões normais e tangenciais</i>	33
4 GRÁFICOS COMPARATIVOS DE MODELOS SUJEITOS A RETRAÇÃO E/OU FLUÊNCIA COM OU SEM INTRODUÇÃO DE ARMADURAS	37
4.1. INTRODUÇÃO	37
4.2. ANÁLISES PARAMÉTRICAS	37
4.2.1. <i>Introdução</i>	37
4.2.2. <i>Reações nos apoios</i>	38

4.2.3. Deslocamentos dos pontos intermédios das vigas	40
4.2.4. Tensões normais e tangenciais.....	42
5 NOTAS FINAIS	47
5.1. Concretização dos objetivos	47
5.2. Aspetos que poderiam ser melhorados	47

ÍNDICE DE FIGURA

FIGURA 1 - PÓRTICO SIMPLES E SUA DEFORMADA (OBTIDO EM EVOLUTION)	3
FIGURA 2 – DISCRETIZAÇÃO DA SECÇÃO TRANSVERSAL.....	4
FIGURA 3 – PÓRTICO COM PORMENOR DAS ARMADURAS (A AZUL)	5
FIGURA 4 – PLANTA E CORTE A-A (DIMENSÕES CONSIDERADAS).....	7
FIGURA 5 – ARMADURA DAS VIGAS SEGUNDO O EIXO X (CORTE TRANSVERSAL).....	20
FIGURA 6 – ARMADURA DAS VIGAS SEGUNDO <i>eixo y</i> (CORTE TRANSVERSAL)	21
FIGURA 7 – ARMADURA DOS PILARES (CORTE TRANSVERSAL)	23
FIGURA 8 – CONJUNTO DOS 6 MODELOS 2D (DEFORMADA A VERMELHO NO MODELO DE 10 PISOS)	26
FIGURA 9 - MODELO 3D DE 2 PISOS (DEFORMADA A VERMELHO)	26
FIGURA 10 – DEMONSTRAÇÃO DAS SECÇÕES ANALISADAS (A VERMELHO).....	27
FIGURA 11 – PORMENOR DAS REAÇÕES AO NÍVEL DE UM APOIO (ESFORÇOS HORIZONTAIS POUCO SIGNIFICATIVOS)	28
FIGURA 12 – INDICAÇÃO DAS 3 TENSÕES CONSIDERADAS	28
FIGURA 13 – R_V NOS APOIOS EXTERIORES	30
FIGURA 14 – R_V NOS APOIOS EXTERIORES	30
FIGURA 15 – R_V NOS APOIOS INTERIORES	30
FIGURA 16 – R_V NOS APOIOS INTERIORES	30
FIGURA 17 – M_y NOS APOIOS EXTERIORES.....	31
FIGURA 18 – M_y NOS APOIOS EXTERIORES.....	31
FIGURA 19 – A_{MAX} NA VIGA DO 1º PISO	31
FIGURA 20 – A_{MAX} NA VIGA DO 1º PISO	31
FIGURA 21 – A_{MAX} NA VIGA DO 2º PISO	32
FIGURA 22 – A_{MAX} NA VIGA DO 2º PISO	32
FIGURA 23 – τ_{xz} NAS VIGAS DO 1º PISO.....	33
FIGURA 24 – τ_{xz} NAS VIGAS DO 1º PISO.....	33
FIGURA 25 – τ_{xz} NAS VIGAS DO 2º PISO.....	33
FIGURA 26 – τ_{xz} NAS VIGAS DO 2º PISO.....	33
FIGURA 27 – σ_x NAS FIBRAS SUPERIORES DAS VIGAS DO 1ºPISO.....	34
FIGURA 28 – σ_x NAS FIBRAS SUPERIORES DAS VIGAS DO 1ºPISO.....	34
FIGURA 29 – σ_x NAS FIBRAS SUPERIORES DAS VIGAS DO 2ºPISO.....	34
FIGURA 30 – σ_x NAS FIBRAS SUPERIORES DAS VIGAS DO 2ºPISO.....	34
FIGURA 31 – σ_x NAS FIBRAS INFERIORES DAS VIGAS DO 1ºPISO	35
FIGURA 32 – σ_x NAS FIBRAS INFERIORES DAS VIGAS DO 1ºPISO	35
FIGURA 33 – σ_x NAS FIBRAS INFERIORES DAS VIGAS DO 2ºPISO	35
FIGURA 34 – σ_x NAS FIBRAS INFERIORES DAS VIGAS DO 2ºPISO	35
FIGURA 35 – R_V NOS APOIOS EXTERIORES	38

FIGURA 36 – R_V NOS APOIOS EXTERIORES	38
FIGURA 37 – R_V NOS APOIOS EXTERIORES	39
FIGURA 38 – R_V NOS APOIOS EXTERIORES	39
FIGURA 39 – R_V NOS APOIOS INTERIORES	39
FIGURA 40 – R_V NOS APOIOS INTERIORES	39
FIGURA 41 – R_V NOS APOIOS INTERIORES	39
FIGURA 42 – R_V NOS APOIOS INTERIORES	39
FIGURA 43 – A_{MAX} NA VIGA DO 1º PISO	40
FIGURA 44 – A_{MAX} NA VIGA DO 1º PISO	40
FIGURA 45 – A_{MAX} NA VIGA DO 1º PISO	40
FIGURA 46 – A_{MAX} NA VIGA DO 1º PISO	40
FIGURA 47 – A_{MAX} NA VIGA DO 2º PISO	41
FIGURA 48 – A_{MAX} NA VIGA DO 2º PISO	41
FIGURA 49 – A_{MAX} NA VIGA DO 2º PISO	41
FIGURA 50 – A_{MAX} NA VIGA DO 2º PISO	41

ÍNDICE DE QUADROS

QUADRO 2.1 – CARACTERÍSTICAS DO BETÃO	9
QUADRO 2.2 – VALORES BÁSICOS DA RELAÇÃO VÃO/ALTURA ÚTIL (λ_0) PARA ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO SEM ESFORÇO NORMAL DE COMPRESSÃO	10
QUADRO 2.3 – VALORES RECOMENDADOS PARA OS COEFICIENTES Ψ PARA EDIFÍCIOS (EXTRATO DO QUADRO A1.1 DO EC0)	11
QUADRO 2.4 – CATEGORIAS DE UTILIZAÇÃO (EXTRATO DO QUADRO 6.1 DO EC1)	11
QUADRO 2.5 – SOBRECARGAS EM PAVIMENTOS, VARANDAS E ESCADAS DE EDIFÍCIOS (EXTRATO DO QUADRO NA-6.2 DO EC1)	11
QUADRO 2.6 – CARGAS PERMANENTES	12
QUADRO 2.7 – COEFICIENTES PARCIAIS RELATIVOS AOS MATERIAIS, PARA ULS (EXTRATO DO QUADRO 2.1N DO EC2)	12
QUADRO 2.8 – SEPARAÇÃO DAS CARGAS	12
QUADRO 2.9 – REAÇÕES NOS APOIOS PARA MODELOS 3D DE 12 PISOS (COM INCREMENTOS)	14
QUADRO 2.10 – REAÇÕES NOS APOIOS PARA MODELOS 3D DE 12 PISOS (SEM INCREMENTOS)	14
QUADRO 2.11 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS COMPONENTES DO MODELO (APÓS PRÉ-DIMENSIONAMENTO)	15
QUADRO 2.12 – CARACTERÍSTICAS DO AÇO	17
QUADRO 2.13 – PROPRIEDADES CONSIDERADAS NO BETÃO	16
QUADRO 2.14 – CARACTERÍSTICAS DA SECÇÃO DOS PILARES	16
QUADRO 2.15 – CARACTERÍSTICAS DA SECÇÃO DAS VIGAS	16
QUADRO 2.16 – VALORES INDICATIVOS DO TEMPO DE VIDA ÚTIL DE PROJETO (EXTRATO DO QUADRO 2.1 DO EC0)	17
QUADRO 2.17 – EXTRATO DA TABELA TABELA1_C12_C90_S500 (FLEXÃO SIMPLES) DO LIVRO “TABELAS E ÁBACOS DE DIMENSIONAMENTO”	19
QUADRO 2.18 – EXTRATO DA TABELA TABELA1_C12_C90_S500 (FLEXÃO SIMPLES) DO LIVRO “TABELAS E ÁBACOS DE DIMENSIONAMENTO”	21
QUADRO 2.19 – VALORES REDUZIDOS DO ESFORÇO NORMAL (γ) E DO MOMENTO FLETOR (M) (COM INCREMENTOS)	22
QUADRO 2.20 – VALORES REDUZIDOS DO ESFORÇO NORMAL (γ) E DO MOMENTO FLETOR (M) (SEM INCREMENTOS)	23
QUADRO 2.21 – COMBINAÇÕES DE ESFORÇOS	23

NOTAÇÕES

MAIÚSCULAS

A – Ações de acidente

A 500 NR SD – Designações da classe de resistência do aço

As – Área da secção de uma armadura para betão armado

As,min – Área da secção mínima de armaduras

As,prov – Área de secção de armaduras existente na secção

As,req – Área de secção de armaduras necessária na secção no *ULS*

Ac – Área de secção de betão

C20/25 – Designações da classe de resistência do betão com base na resistência em cilindros

Cnom – Recobrimento nominal

Cmin – Recobrimento mínimo

Ecm – Módulo de elasticidade secante do betão

E_{c(28)} – Módulo de elasticidade tangente na origem, $\sigma_c = 0$, para um betão de massa volúmica normal aos 28 dias de idade

Es – Módulo de elasticidade do aço

G – Ação permanente

G_k – Valor característico de uma ação permanente

K_l - Coeficiente que tem em conta o comprimento do vão

K_t - Coeficiente que tem em conta as secções em “T”

K σ – Razão tensões-resistências $\sigma_c/fck_{(t_0)}$, em que σ_c é a tensão de compressão e $fck_{(t_0)}$ é a resistência característica à compressão do betão à data do carregamento

K _{σ_s} - Coeficiente dado pelo quociente entre 310 MPa e a tração no aço a meio vão, para ações de cálculo em *ULS*

M_{Ed} – Valor de cálculo do momento fletor atuante

M_{Rd} – Valor de cálculo do momento fletor resistente

Q – Ações variáveis

Q_k – Valor característico de uma ação variável

S500 – Designações dos tipos correntes de armaduras ordinárias

S_d – Combinação de cálculo

Ac – Área da secção transversal do betão

MINÚSCULAS

a_{nom} – Recobrimento nominal

a_{max} – Flecha máxima

a_{min} – Recobrimento mínimo

b – Largura da secção retangular

b_t – Largura média da zona traciona

d – Altura útil da secção transversal

f_{cd} – Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão

f_{cm} – Valor médio da tensão de rotura do betão à compressão

f_{ck} – Valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade

f_{ctm} – Valor médio da resistência à tração do betão

f_{yd} – Valor de cálculo da tensão de cedência do aço das armaduras ordinárias

f_{yk} – Valor característico da tensão de cedência do aço das armaduras ordinárias

h – Altura total de uma secção transversal

u – Perímetro da parte da secção transversal exposta a secagem

x, y, z – Eixos principais

ALFABETO GREGO

α - Coeficiente de dilatação térmica linear

ν – Coeficiente de Poisson

γ – Peso volúmico

γ – Coeficiente parcial

γ_c – Coeficiente parcial de segurança relativo ao betão

γ_s – Coeficiente parcial de segurança relativo ao aço

ΔC_{dev} – Tolerância de execução no recobrimento

ϵ_s – Extensão no aço

ϵ_{cs} – Extensão total de retração

ϵ_{cd} – Extensão de retração por secagem

ϵ_{ca} – Extensão de retração autogénea

ϵ_{cc} – Extensão de deformação do betão por fluência

λ – Coeficiente de esbelteza

λ_0 – Valor limite vão \ altura

μ – Valores reduzidos do momento fletor

ρ – Taxa de armadura

σ_1, σ_2 e σ_3 – Eixos principais das tensões normais

σ_c – Tensão de compressão no betão

σ_x – Tensão normal

τ_{xz} – Tensões tangenciais na direção do eixo z

τ_{xy} – Tensões tangenciais na direção do eixo y

u – Valor reduzido do esforço normal

φ - Coeficiente teórico de fluência não linear

$\varphi n_{1(\infty, t_0)}$ – Coeficiente teórico de fluência não linear, que substitui $\varphi_{(\infty, t_0)}$

\emptyset – Diâmetro de um varão

Ψ_0 – Coeficiente para a determinação do valor de combinação de uma ação variável

Ψ_1 – Coeficiente para a determinação do valor frequente de uma ação variável

Ψ_2 – Coeficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma ação variável

$\tilde{\omega}$ – Percentagem mecânica de armadura

ABREVIATURAS

cm – Centímetros

esp – Espessura

m – Metros

EC0 – Bases para o projeto de estruturas

EC1 – Eurocódigo 1 - Ações em estruturas

EC2 – Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão

M_y – Momentos fletores segundo o eixo y

PP – Peso próprio

RV – Reações verticais

SLS – Estado limite de utilização (Serviceability Limit State)

ULS – Estado limite último (Ultimate Limit State)

XC1 – Classe de exposição para o betão em função das condições ambientais

1

INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO E ESTADO DA ARTE

O cálculo estrutural conheceu nos últimos anos um grande desenvolvimento, com a utilização de modelos de cálculo cada vez mais automatizados e avançados. Por forma a fazer uma correta análise estrutural é necessária a utilização deste tipo de modelos que permitem a utilização de análises lineares e não-lineares, estáticas e dinâmicas de estruturas.

Atualmente tem-se acesso a uma grande variedade deste tipo de modelos que vieram solucionar grande parte dos problemas de cálculo, de uma forma relativamente simples e rápida. Isto veio revolucionar o cálculo estrutural na medida em que não só se ultrapassou o problema da morosidade dos cálculos mas também se conseguem obter resultados com uma precisão e fiabilidade assinaláveis. As ferramentas de cálculo de elementos finitos orientados a aplicações da engenharia têm tido uma grande evolução o que resulta numa cada vez maior capacidade de se fazer uma correta modelação de estruturas com elevada complexidade.

Muitas vezes uma análise estrutural não contempla todo o seu historial evolutivo, essencial para acautelar erros de projeto e assegurar um bom desempenho ao longo do tempo de vida da estrutura tanto na fase de construção como na fase de exploração da mesma. No entanto existem já bastantes trabalhos com uma análise bastante detalhada sobre este tema (Kripka, M., 1990) e portanto não será analisado ao pormenor o aspeto do faseamento construtivo.

Apesar de muitas ferramentas de cálculo permitirem a introdução de faseamentos construtivos ou efeitos diferidos, o estudo da evolução percentual com a complexidade de uma estrutura e da sua verdadeira influência nos resultados finais de um cálculo deste tipo parecem ainda não ter sido alvo de grande atenção. No presente trabalho fez-se uma análise paramétrica de alguns desses fatores de cálculo, e da sua relevância nos vários resultados obtidos. recorrendo-se a visualizações gráficas que a demonstrem de forma clara e elucidativa. Espera-se que a presente dissertação seja útil, na medida em que não existem muitos trabalhos com estudos aprofundados e que abordam concretamente este tema, servindo assim de base a outros trabalhos do género que venham dar continuidade a aspetos aqui abordados e que eventualmente os explorem de outras maneiras, de forma mais ou menos aprofundada.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente tese foi dividida em cinco capítulos, sendo o presente o Capítulo 1. Neste mesmo capítulo estabelecem-se os objetivos principais da dissertação, bem como algumas considerações sobre o estado da arte, sendo que ainda se faz uma breve descrição da forma de utilização do programa em exploração.

Com vista à realização de análises paramétricas, no Capítulo 2 criou-se um modelo de estudo ao qual foram atribuídas todas as características necessárias à sua completa caracterização.

No Capítulo 3 passou-se à elaboração de análises paramétricas, maioritariamente recorrendo-se a visualizações gráficas, com o objetivo de tirar conclusões relativamente à diferença que terá a consideração de faseamentos construtivos. Estas análises foram feitas considerando vários modelos construídos a partir do modelo previamente constituído ao longo do Capítulo 2.

No Capítulo 4 foram novamente feitas análises paramétricas mas agora com o objetivo de tirar conclusões relativamente à influência que terão os efeitos diferidos do betão (fluência e retração) e também a inclusão de armaduras no modelo de cálculo

No Capítulo 5 apresenta-se um resumo do trabalho desenvolvido, sintetizando-se os principais objetivos que foram alcançados e indicando-se alguns dos desenvolvimentos possíveis que a presente dissertação poderá ter numa perspetiva de continuidade da mesma em estudos futuros.

1.3. MODELAÇÃO NUMÉRICA

1.3.1. SOFTWARE EM EXPLORAÇÃO

Como não podia deixar de ser, para ajudar ao desenvolvimento deste trabalho, seria necessária uma ferramenta de auxílio ao cálculo estrutural que permitisse a introdução de pormenores construtivos como os faseamentos construtivos, reologia do betão ou a introdução de armaduras. Para isso foi utilizado um software, denominado Evolution, que tem vindo a ser desenvolvido pelo professor Miguel Ferraz (Ferraz, M. Â. C., 2010), sendo um programa de carácter não comercial. Trata-se de uma ferramenta de cálculo bastante útil, que tem por base uma linguagem de programação em influência C Sharp (produzida pela empresa Microsoft). O programa permite simular, tanto a fase construtiva como a fase de exploração de uma estrutura, isto é, acompanhar o desempenho ao longo de todo o ciclo de vida da mesma.

Serão apresentados os elementos necessários para a modelação numérica do faseamento construtivo de uma estrutura porticada que considere alguns dos fatores passíveis de influenciar a sua resposta estrutural. Vai-se ainda apresentar um conjunto de imagens obtidas a partir do Evolution, o qual oferece boas possibilidades a nível gráfico com uma fácil visualização dos pormenores estruturais introduzidos e resultados obtidos ao longo do ciclo de vida de uma estrutura.

1.3.2. UTILIZAR O EVOLUTION

O programa de cálculo Evolution recorre a uma formulação tridimensional em elementos finitos de viga, baseada na formulação de Timoshenko com análise não-linear geométrica. Nesta formulação consideram-se as seguintes hipóteses:

- Linearidade física;
- Linearidade geométrica;
- Homogeneidade e isotropia do material estrutural.

Na formulação do elemento de viga de Timoshenko, as secções planas inicialmente perpendiculares ao eixo da peça permanecem planas após a deformação do elemento estrutural, mas não necessariamente perpendiculares a esse eixo. Supõe-se que uma secção normal ao eixo da viga não mantém essa característica após a deformação e deste modo é possível considerar a deformação devida ao corte.

As estruturas modeladas por intermédio do programa terão então como base um conjunto de elementos constituídos por 3 nós cada, sendo que as secções transversais são discretizadas por fibras. Como exemplo vai-se apresentar um pórtico simples que foi modelado e calculado através do programa. Obtiveram-se as representações gráficas apresentadas na Figura 1, onde se podem ver os elementos considerados na sua análise bem como o carregamento aplicado no pórtico (cargas verticais sobre a viga). Na figura está incluída a vermelho uma representação da deformada obtida pelo programa. De notar que a escala usada para a deformada não é a real, estando algo exagerada apenas para permitir a sua fácil visualização.

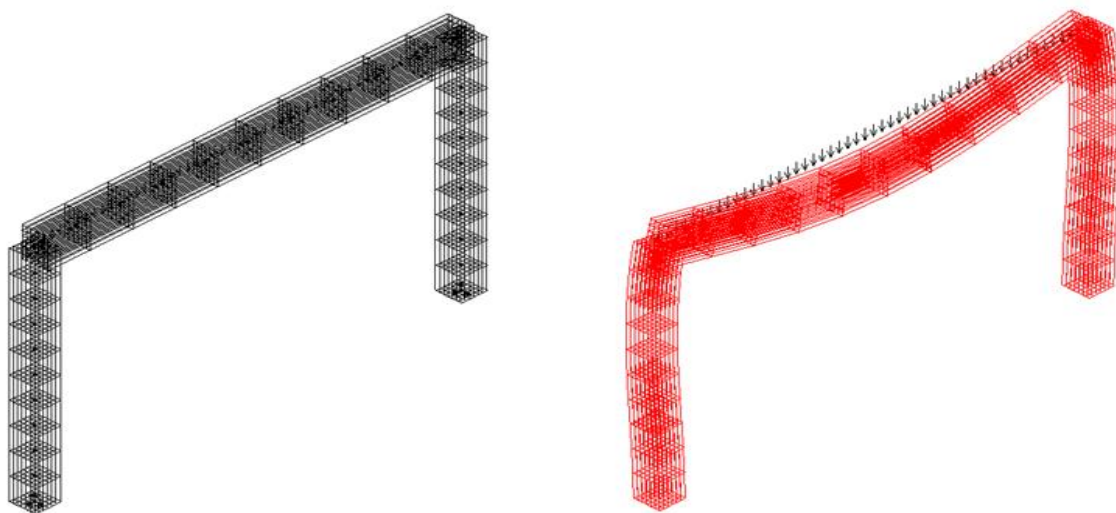


Figura 1 - Pórtico Simples e sua deformada (obtido em Evolution)

Usando uma vez mais as potencialidades gráficas do Evolution pode ver-se na Figura 2 as secções atribuídas a todos os elementos do pórtico exemplificado. Pode-se facilmente verificar que, neste caso, recorreu-se a uma malha de 10*10 fibras perfazendo um total de 100 fibras a discretizar a secção. Para cada uma delas poderemos obter, por exemplo, as tensões e extensões segundo os 3 eixos locais. Na Figura 2 encontra-se representado um pormenor de um dos elementos com uma perspetiva sobre a malha considerada. De referir ainda que o refinamento das malhas poderá dar resultados com maior precisão mas tem também o inconveniente de tornar o modelo mais pesado a nível de cálculo. É portanto aconselhável que as malhas escolhidas tenham em linha de conta a estrutura introduzida e os esforços que se pretende obter através do cálculo da mesma.

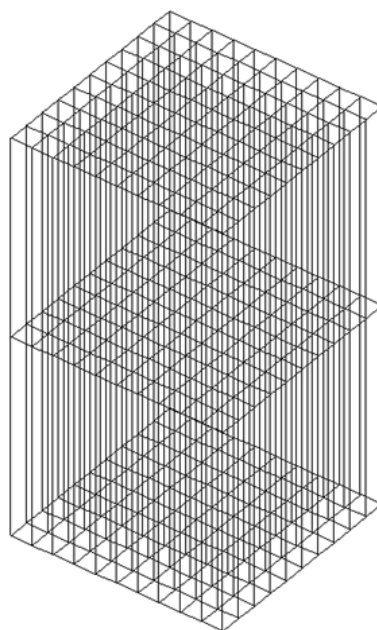


Figura 2 – Discretização da Secção Transversal

1.3.3. POTENCIALIDADES DO PROGRAMA

O programa permite a análise não linear geométrica e material de estruturas hiperestáticas. Possibilita pois uma consideração dos fenómenos diferidos tanto do betão, através da introdução de retração e fluência, como das armaduras de pré-esforço com introdução de fenómenos de relaxação. Feita a análise estrutural pode obter-se uma série de valores de cálculo como as reações dos apoios, deslocamentos de nós, e tensões/extensões nas fibras segundo a direção dos 3 eixos locais.

Na discretização das secções transversais em fibras pode atribuir-se às mesmas todo o tipo de características pretendidas. Tem-se pois a possibilidade de introduzir no cálculo as armaduras pretendidas sendo que na Figura 3 pode visualizar-se um pórtico onde estas estão representadas a cor azul.

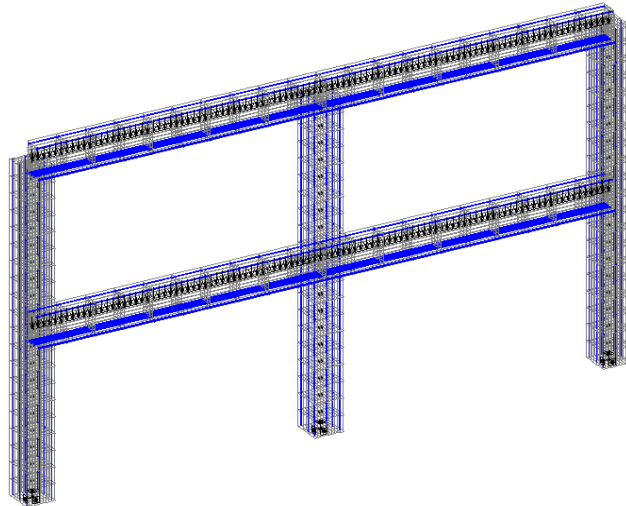


Figura 3 – Pórtico com Pormenor das Armaduras (a azul)

A evolução dos esforços na estrutura provocados pelos faseamentos construtivos pode também ser alvo de um acompanhamento ao longo do tempo, registando-se as variações verificadas em cada etapa de cálculo.

Sendo baseado numa análise incremental, pode associar-se a cada incremento introduzido, não só o momento em que este passará a atuar, mas também uma série de outras características que possam estar associadas. Entre essas características estarão a geometria das secções, os materiais constitutivos dos elementos introduzidos em cada incremento ou ainda o carregamento a aplicar na estrutura.

2

Criação de um Modelo de Cálculo

2.1. NOTA INTRODUTÓRIA

Neste capítulo apresenta-se a conceção de um modelo de estudo, sobre o qual se definem todo o tipo de características necessárias à sua completa caracterização. O objetivo passa por construir um modelo tridimensional de baixa complexidade ao qual serão associados os materiais utilizados e processos construtivos adotados, simulando-se o mais aproximadamente possível uma estrutura de características correntes. Na Figura 4 encontra-se representada uma planta do modelo analisado (estrutura porticada) assim como um corte transversal A-A do mesmo. Apenas se encontra representado um modelo de um piso para efeitos meramente exemplificativos.

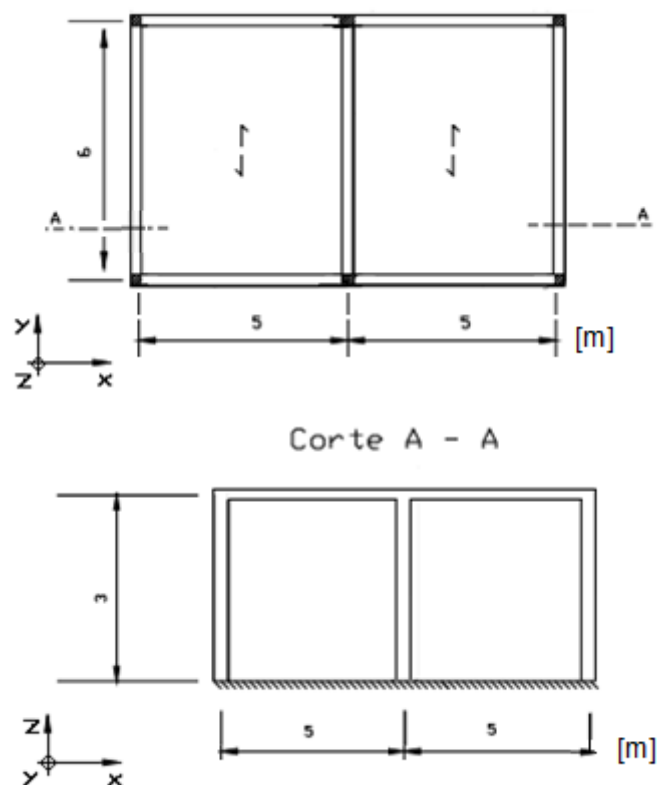


Figura 4 – Planta e Corte A-A (Dimensões Consideradas)

De notar que foram consideradas lajes maciças e unidirecionais. As armaduras foram colocadas segundo o eixo y e como tal são as vigas segundo o eixo x que estarão a receber uma carga mais significativa. As dimensões que foram atribuídas aos vãos nas duas direções e ao pé direito de cada piso estão representadas na mesma figura. De seguida, vão realizar-se alguns cálculos de pré-dimensionamento, para que as partes constituintes da estrutura tenham dimensões razoáveis em relação aos carregamentos atribuídos.

No Capítulo 3 vão fazer-se análises paramétricas no que toca aos faseamentos construtivos adotados sobre este modelo. O objetivo passa não só por analisar a diferenciação de esforços mas também quantificar a sua variação e evolução com o número de faseamentos construtivos considerados.

De referir que o estudo de faseamento deve ser realizado também com o objetivo adicional de minimização do tempo de permanência das cofragens em obra, de modo a libertar as áreas que lhe ficavam subjacentes para a realização dos trabalhos necessários e atingir assim os cumprimentos de prazos. Nesse sentido, o empreiteiro no seu plano de trabalhos inicial define a sequência de operações de betonagem previstas cuja estabilidade é estudada individualmente.

Desta forma, separou-se temporalmente as ações, que serão introduzidas ao longo da obra. Os faseamentos construtivos a introduzir em cada um dos pisos seguirão aproximadamente a seguinte ordem cronológica:

1. Introdução dos pilares do piso i (Incremento 0);
2. Introdução do Peso Próprio (PP) dos pilares do piso i (Incremento 1);
3. Introdução das vigas do piso i e do seu PP (Incremento 2);
4. Introdução de um esforço vertical descendente aplicado por metro de viga representando o PP das lajes do piso i (Incremento 3).

O processo é repetido em cada um dos pisos e por fim, quando todos os pisos tiverem passado por cada uma destas fases teremos ainda um último incremento onde se acrescentará um novo esforço vertical descendente, aplicado por metro, em todas as vigas do nosso modelo (Incremento n), que representa as restantes cargas permanentes e a sobrecarga.

2.2. PRÉ-DIMENSIONAMENTOS

2.2.1. MATERIAIS E DIMENSÕES DO MODELO

Como é dito no ponto 3.1.3.(2) do *EC2* (Eurocódigo 2, EN 1992-1-1:2004), o módulo de elasticidade do betão depende dos módulos de elasticidade dos seus componentes. O valor do módulo de elasticidade apresentado no Quadro 2.1 é retirado do Quadro 3.1 do *EC2*, no qual são indicados valores aproximados para o módulo de elasticidade E_{cm} , módulo secante entre $\sigma_c = 0$ e $0.4 * f_{cm}$ para betão com agregados de quartzo. Segundo o ponto 3.1.3.(4) do *EC2*, o coeficiente de Poisson (ν) poderá ser considerado igual a 0.2 para betão não fendilhado. Também segundo o *EC2*, no ponto 3.1.3.(5) diz-se que na falta de informações mais rigorosas, o coeficiente de dilatação térmica linear (α) pode ser considerado igual a $10 * 10^{-6} K^{-1}$. Os valores referidos tanto para o coeficiente de Poisson (ν) como para o coeficiente de dilatação térmica linear (α) foram ambos adotados no estudo. De notar ainda que no Anexo A do *EC1* (Eurocódigo 1, EN 1991-1-1:2002) se encontram os quadros dos valores nominais dos pesos volúnicos dos materiais de construção. É a partir do Quadro A.1 (Materiais de construção - Betão e argamassa) que se tira o valor do peso volúmico (γ) para o betão. Todas as características consideradas para o betão estão apresentadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Características do Betão

Classe de resistência do betão	C20/25
f_{cm} (MPa)	28
f_{ctm} (MPa)	2.2
E_{cm} (GPa)	30
γ (kN/m ³)	25
Comportamento	Elástico e linear
ν	0.2
α (K ⁻¹)	$10 * 10^{-6}$

2.2.2. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DA ESPESSURA A ATRIBUIR À LAJE

No ponto 7.4.1 do *EC2* são apresentadas algumas generalidades no que diz respeito ao controlo da deformação, nomeadamente é referido que o aspeto e as condições de utilização da estrutura podem ser alterados quando a flecha calculada de uma viga, laje ou consola sujeitas a ações quase-permanentes (Ψ_2) for superior ao vão/250. É também referido no ponto 7.4.2 que em geral não é necessário um cálculo explícito das flechas, uma vez que nos casos correntes são suficientes regras simples, tais como a limitação da relação vão/altura, para evitar, em situações normais, problemas de deformação excessiva. Por forma a atribuir-se uma espessura adequada às lajes do modelo vamos utilizar as fórmulas 2.1 e 2.2. O valor de λ_0 foi retirado do Quadro 7.4N da alínea do *EC2* atrás referida. O Quadro 2.2 apresenta o extrato do Quadro 7.4N relevante para o caso em estudo.

$$\frac{l}{d} \leq \lambda \quad (2.1.)$$

$$\lambda = \lambda_0 * K_t * K_l * K_{\sigma s} \quad (2.2.)$$

Onde:

K_l - Coeficiente que tem em conta o comprimento do vão

K_t - Coeficiente que tem em conta as secções em “T”

λ_0 - Valor limite vão \ altura

$K_{\sigma s}$ - Coeficiente dado pelo quociente entre 310 MPa e a tração no aço a meio vão, para ações de cálculo em ULS

Quadro 2.2 – Valores básicos da relação vão/altura útil (λ_0) para elementos de betão armado sem esforço normal de compressão, de acordo com o EC2 (Eurocódigo 2, EN 1992-1-1-2004)

Sistema estrutural	k	Betão fortemente solicitado $\rho = 1.5\%$	Betão levemente solicitado $\rho = 0.5\%$
Viga simplesmente apoiada, laje simplesmente apoiada armada numa ou em duas direções	1.0	14	20

Considerando betão levemente solicitado ($\rho = 0.5\%$) temos $\lambda_0 = 20$. Temos ainda que os valores de K_t e de K_l serão ambos unitários por se tratar de uma laje maciça e com vãos inferiores a 7 metros, respetivamente. O valor de $K_{\sigma s}$ foi retirado pela fórmula 2.3.

$$K_{\sigma s} = \frac{500}{f_{yk}} * \frac{A_{s,prov}}{A_{s,req}} = \frac{500}{500} * 1.25 = 1.25 \quad (2.3.)$$

$$\frac{A_{s,prov}}{A_{s,req}} \cong 1.25 \quad (2.4.)$$

Onde:

$A_{s,prov}$ - Área de secção de armaduras existente na secção

$A_{s,req}$ - Área de secção de armaduras necessária na secção no estado limite último

Sabendo que o maior vão das lajes é de 6 metros temos então o valor d das fórmulas 2.1 e 2.2.

$$\lambda = 20 * 1 * 1 * 1.25 = 25 \quad (2.5.)$$

$$d \geq \frac{6}{25} = 0.24m \quad (2.6.)$$

Sendo:

d – Altura útil da secção transversal

Por fim, fazendo um pequeno ajuste e colocando a nossa espessura da laje do lado da segurança vamos admitir que todas as lajes terão $esp = 0.30m$ ($d \approx 0.27m$).

2.2.3. AÇÕES CONSIDERADAS

No capítulo 4.1.1 do EC0 é feita a classificação das ações. Neste ponto é dito que as ações devem ser classificadas, de acordo com a sua variação no tempo, da seguinte forma:

- ações permanentes (G), como, por exemplo, o peso próprio das estruturas, dos equipamentos fixos e dos pavimentos rodoviários, e as ações indiretas causadas por retração e assentamentos diferenciais;
- ações variáveis (Q), como, por exemplo, as sobrecargas nos pavimentos, vigas e coberturas dos edifícios, a ação do vento ou a ação da neve;
- ações de acidente (A), como, por exemplo, explosões ou choque provocado por veículos.

No Anexo A1 do *EC0* estão indicadas as regras e métodos para definir as combinações de ações para edifícios, valores de cálculo recomendados para as ações permanentes, variáveis e de acidente e também os coeficientes Ψ a utilizar no projeto de edifícios. Os valores recomendados para os coeficientes Ψ encontram-se especificados no Quadro A1.1 do mesmo anexo. No Quadro 2.3 (extrato do Quadro A1.1 do *EC0*) especificam-se esses valores tendo em conta a categoria que foi adotada.

Quadro 2.3 – Valores recomendados para os coeficientes Ψ para edifícios (extrato do Quadro A1.1 do *EC0*)

Ação	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Sobrecargas em edifícios (ver a EN 1991-1-1) Categoria A: zonas de habitação	0.7	0.5	0.3

Para atribuir ao modelo um carregamento adequado recorre-se ao *EC1*, o qual define ações e apresenta linhas de orientação para o projeto de edifícios abordando os pesos volúnicos dos materiais de construção, pesos próprio das construções e sobrecargas nos edifícios. Segundo o Quadro 6.1 do mesmo podem ver-se as categorias de utilização para edifícios. Define-se a estrutura como pertencendo à Categoria A, tal como está representado no Quadro 2.4 (extrato do Quadro 6.1 do *EC1*).

Quadro 2.4 – Categoria de Utilização (extrato do Quadro 6.1 do *EC1*)

Categoria	Utilização específica	Exemplos
A	Atividades domésticas e residenciais	Salas em edifícios de habitação; quartos e enfermarias de hospitais; quartos de hotéis, cozinhas e lavabos

Na secção NA.2 do Anexo Nacional do *EC1* definem-se os Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDP). Aqui é referido que deve adotar-se o Quadro NA-6.2 em vez do Quadro 6.2, no qual estão definidas as sobrecargas em pavimentos, varandas e escadas de edifícios de acordo com as categorias das zonas carregadas. No Quadro 2.5 (extrato do Quadro NA-6.2 do *EC1*) podem ver-se os intervalos de valores admitidos nas sobrecargas. Tendo em conta os valores do quadro admitiu-se, desta forma, uma sobrecarga de 2.0 KN/m^2 .

Quadro 2.5 – Sobrecargas em pavimentos, varandas e escadas de edifícios (extrato do Quadro NA-6.2 do *EC1*)

Categorias de zonas carregadas	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]
Categoria A - Pavimentos	1.5 a 2.0	2.0 a 3.0

Quanto às cargas permanentes, definidas com base em valores médios normalmente adotados, estão apresentados no Quadro 2.6.

Quadro 2.6 – Cargas Permanentes

Componentes	Carga Atribuída
Revestimentos	1.5 KN/m ²
Paredes Divisórias	1.5 KN/m ²
Paredes Exteriores	8 KN/m

Na alínea 2.4.2.4 do *EC2* diz-se que se deverão utilizar os coeficientes parciais relativos aos materiais, γ_c e γ_s , definidos para *ULS*. Nesta alínea, no Quadro 2.1N, estão representados esses coeficientes parciais. O Quadro 2.7 é um extrato do mesmo onde temos os coeficientes de interesse para o caso em análise.

Quadro 2.7 – Coeficientes parciais relativos aos materiais, para ULS (extrato do Quadro 2.1N do *EC2*)

Situações de projeto	γ_c para betão	γ_s para aço de armaduras para betão armado
Persistentes	1.5	1.15
Transitórias		

Como vimos antes, foram consideradas lajes com armaduras unidirecionais e como tal os esforços verticais serão aplicados nas vigas segundo o eixo x. A separação das cargas que contribuem para os esforços verticais a aplicar nas vigas, entre aquelas que serão introduzidos por piso e as finais, procura retratar um processo construtivo convencional e encontra-se explicitada no Quadro 2.8.

Quadro 2.8 – Separação das Cargas

Incrementos Intermédios	Último Incremento
PP dos pilares	Revestimentos
PP das vigas	Paredes Divisórias
PP da laje	Paredes Exteriores
	Sobrecarga

Vai-se então determinar as cargas verticais a introduzir, por metro de viga, tanto nos incrementos intermédios como no último incremento. Estes valores de cálculo estão definidos para *ULS* (segundo a alínea 2.4.2.4 do *EC2*). A largura de influência neste caso é de 3 metros e a combinação de ULS segue a equação 2.7. Para os incrementos intermédios temos o valor obtido em 2.8 e para o último incremento temos o valor obtido em 2.9.

$$S_d = 1.35 * G_k + 1.5 * Q_k \quad (2.7.)$$

G_k – Valor característico de uma ação permanente

Q_k – Valor característico de uma ação variável

$$S_d = 1.35 * (0.30 * 25 * 3) + 1.5 * 0 = 30.375 \text{ KN/m} \quad (2.8.)$$

$$S_d = 1.35 * ((1.5 + 1.5) * 3 + 8) + 1.50 * (2 * 3) = 31.950 \text{ KN/m} \quad (2.9.)$$

2.2.4. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS E PILARES E OUTRAS VERIFICAÇÕES

2.2.4.1. Verificações nas Lajes

O cálculo do momento fletor reduzido é feito através da fórmula 2.10, sendo que para as lajes tem-se como referência $\mu_{lajes} \approx 0.10$. O cálculo do μ_{laje} está efetuado por intermédio de 2.11, 2.12 e 2.13.

$$\mu = \frac{M_{rd}}{b * d^2 * f_{cd}} \quad (2.10.)$$

μ – Valores reduzidos do momento fletor

$$p_{lajes} = 1.35 * (0.30 * 25 + 1.5 + 1.5) + 1.5 * 2 = 17.175 \text{ KN/m}^2 \quad (2.11.)$$

$$M_{Rd} = \frac{p_{lajes} * 6^2}{8} = 77.288 \text{ KN.m} \quad (2.12.)$$

$$\mu_{laje} = \frac{M_{Rd}}{b * d^2 * f_{cd}} = \frac{77.288}{1 * 0.27^2 * \frac{(20 * 10^3)}{1.5}} \cong 0.08 \cong 0.10 \quad OK \quad (2.13.)$$

2.2.4.2. Pré-Dimensionamento das vigas

O valor de h correntemente considerado mais económico corresponde a um valor de extensão na armadura de tração de cerca de $\epsilon_s = 3\%$ a 4% sob ação de um momento atuante. Em geral toma-se $\mu_{vigas} \approx 0.20$ a 0.30 . Neste caso, para pré-dimensionar o valor de h no caso de vigas retangulares optou-se por $\mu_{vigas} = 0.25$. O valor de μ_{vigas} será obtido através de 2.14, 2.15, e 2.16.

$$p_{vigas} = 1.35 * ((0.30 * 25 + 1.5 + 1.5) * 3 + 8) + 1.50 * (2 * 3) \\ = 62.325 \text{ Kn/m} \quad (2.14.)$$

$$M_{Rd} = \frac{p_{vigas} * 5^2}{8} = 194.766 \text{ Kn.m} \quad (2.15.)$$

$$\mu_{vigas} = \frac{M_{Rd}}{b * d^2 * f_{cd}} = \frac{194.766}{0.30 * d^2 * \frac{(20 * 10^3)}{1.5}} = 0.25 \rightarrow d = 0.44 \text{ m} \quad (2.16.)$$

Através do cálculo do momento fletor reduzido poder-se-á atribuir para a altura da viga as seguintes dimensões: $h = 0.60\text{m}$ ($d = 0.54\text{m}$) e $b = 0.30\text{m}$.

2.2.4.3. Pré-Dimensionamento dos pilares

Os pilares do modelo aqui considerado estão sujeitos a flexão composta, no entanto os momentos registados tomam valores muito pouco significativos relativamente ao seu esforço axial, principalmente para modelos com um elevado número de pisos que serão os condicionantes. Nos Capítulos 3 e 4 vão-se analisar modelos de até 12 pisos e portanto far-se-á o dimensionamento dos pilares para esse caso, por se tratar do mais desfavorável. Como simplificação colocaram-se os pilares da estrutura com secção quadrangular e com dimensões idênticas, pelo que os pilares interiores, por estarem a receber mais carga, serão os condicionantes. Para uma estrutura porticada plana tridimensional com 12 pisos, de agora em diante denominada por 3D, os esforços nos apoios que se obteve para as reações verticais (RV) e momentos fletores segundo o eixo y (M_y) após fazer o cálculo recorrendo ao software Evolution, efetuados para duas situações distintas, com ou sem análise incremental, são os apresentados nos Quadros 2.9 e 2.10. Para este cálculos foram usados todos os dados até agora obtidos sendo que se colocou arbitrariamente pilares de secção quadrangular de 50 cm de lado, apenas para efeitos de pré-dimensionamento.

Quadro 2.9 – Reações nos apoios para modelos 3D de 12 pisos (com análise incremental)

Tipos de Apoios	Exteriores	Interiores
RV [KN]	2209	3529
M_y [KN.m]	26.5	≈ 0

Quadro 2.10 – Reações nos apoios para modelos 3D de 12 pisos (sem análise incremental)

Tipos de Apoios	Exteriores	Interiores
RV [KN]	2263	3421
M_y [KN.m]	22.5	≈ 0

Tendo em conta que os momentos fletores são bastante reduzidos dimensionar-se-á os pilares apenas para compressão simples segundo a fórmula 2.17. Como se pretende uma secção quadrangular obtemos o seu lado (b) pelas fórmulas 2.18 e 2.19.

$$NRd_{max} = A_c * f_{cd} \quad (2.17.)$$

$$A_c = b^2 \quad (2.18.)$$

$$b^2 = \frac{NRd_{max}}{f_{cd}} = \frac{3529}{\frac{20 \cdot 10^3}{1.5}} \cong 0.265 \rightarrow b \cong 0.51m \quad (2.19.)$$

Como podemos verificar através deste cálculo as dimensões dos pilares deveriam ser um pouco superiores mas vamos optar por manter uma secção quadrangular com $b = 50cm$, ou seja, pilares ligeiramente subdimensionados apenas para a situação mais gravosa. De referir que muito provavelmente com introdução da armadura necessária para estes pilares já seria satisfeita a condição

de compressão simples nos mesmos. As dimensões finais a dar ao nosso modelo 3D reduzido são portanto as apresentadas no Quadro 2.11.

Quadro 2.11 – Características gerais das componentes do modelo (Após Pré-Dimensionamento)

Lajes	Maciças simplesmente apoiadas e unidirecionais com esp = 0.30m
Vigas	Considerar secção com b = 0.30 m e h = 0.60m
Pilares	Considerar secção quadrada b*b = 0.50*0.50m

2.3. INTRODUÇÃO DOS EFEITOS REOLÓGICOS DO BETÃO

2.3.1. OBJETIVOS, REGULAMENTAÇÃO E CONSIDERAÇÕES

Como referimos já no Capítulo 1 vai-se estudar também a influência de propriedades reológicas do betão, como são o caso da fluência e da retração.

Alguns dos efeitos diferidos do betão, como são o caso da fluência e da retração, poderão ter bastante significado na análise estrutural. Segundo o ponto 3.1.4 (2) do *EC2* a fluência e a retração do betão dependem da humidade ambiente, das dimensões do elemento e da composição do betão, sendo que a fluência também depende da idade do betão no primeiro carregamento assim como da duração e da intensidade da carga. No ponto 3.1.4 (3) é referido que a deformação do betão por fluência, $\epsilon_{cc}(\infty, t_0)$ na idade $t = \infty$ para uma tensão de compressão constante, σ_c , aplicada na idade do betão t_0 , é dada pela fórmula 2.20.

$$\epsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) * \epsilon_{ci} = \varphi(\infty, t_0) * \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (2.20.)$$

Diz-se ainda no ponto 3.1.4 (4) que quando a tensão de compressão do betão na idade t_0 excede o valor de $0.45f_{ck}(t_0)$, deverá considerar-se a não linearidade da fluência. Para este caso o coeficiente teórico de fluência não linear deverá ser obtido pela expressão 2.21.

$$\varphi n1(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) * e^{1.5 * (K\sigma - 0.45)} \quad (2.21.)$$

Onde:

$\varphi n1(\infty, t_0)$ – Coeficiente teórico de fluência não linear, que substitui $\varphi(\infty, t_0)$

$K\sigma$ – Razão tensões-resistências $\sigma_c/f_{ck}(t_0)$, em que σ_c é a tensão de compressão e $f_{ck}(t_0)$ é a resistência característica à compressão do betão à data do carregamento

No ponto 3.1.4 (5) pode ler-se que a extensão total de retração é constituída por duas componentes, a extensão de retração por secagem e a autogénea. A extensão de retração por secagem evolui lentamente, uma vez que é função da migração da água através do betão endurecido. Já a extensão de retração autogénea desenvolve-se durante o endurecimento do betão, na sua maior parte nos primeiros dias após a betonagem e é uma função linear da resistência do betão. Deverá ser considerada de modo específico quando se coloca betão novo sobre betão endurecido. Assim, o valor total de extensão por retração é obtido pela expressão 2.22.

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad (2.22.)$$

Onde:

ε_{cs} – Extensão total de retração

ε_{cd} – Extensão de retração por secagem

ε_{ca} – Extensão de retração autógena

Neste ponto encontram-se expressões para o cálculo das extensões de retração por secagem e autógena. No Anexo B do mesmo *EC2*, que em Portugal tem um carácter normativo, encontram-se expressões básicas para a determinação do coeficiente de fluência e também da extensão de retração por secagem. Esta informação já se encontra no modelo de cálculo e é portanto fazendo uso dessa ferramenta que se fará a análise estrutural.

2.3.2. CARACTERÍSTICAS ATRIBUÍDAS

Apresenta-se de seguida, nos Quadros 2.12, 2.13 e 2.14, as características atribuídas ao betão para a consideração dos seus efeitos diferidos (retração e fluência). Na falta de uma caracterização perfeita considerou-se uma humidade relativa de 70%.

Quadro 2.12 – Propriedades consideradas no betão

Humidade relativa (%)	70
$E_c(28)(\text{GPa})$	30
$f_{cm}(\text{MPa})$	28
Idade Inicial	7
Classe de Cimento	N
ν	0.2

Quadro 2.13 – Características da secção dos pilares

u	2
A_c	0.25

Quadro 2.14 – Características da secção das vigas

u	1.8
A_c	0.18

Onde:

A_c – Área de secção de betão

u – Perímetro da parte da secção transversal exposta a secagem

2.3. CÁLCULO DAS ARMADURAS

2.3.1. CARACTERÍSTICAS ATRIBUÍDAS

Por forma que sejam estudados os efeitos diferidos no betão, vão-se usar as armaduras como o elemento diferenciador as quais serão introduzidas no presente modelo. As características consideradas para o aço das armaduras serão as apresentadas no Quadro 2.15.

Quadro 2.15 – Características do Aço

Classe do Aço	A 500 NR SD
E_s (GPa)	206 GPa
Comportamento	Comportamento instantâneo elástico e linear

2.3.2. DEFINIÇÃO DOS RECOBRIMENTOS

No Quadro 2.1 do *EC0* são apresentadas, a título indicativo, categorias do tempo de vida útil de projeto, sendo que a categoria neste estudo adotada é a que está apresentada no Quadro 2.16.

Quadro 2.16 – Valor indicativo do tempo de vida útil de projeto (extrato do Quadro 2.1 do *EC0*)

Categoria do tempo de vida útil de projeto	Valor indicativo do tempo de vida útil de projeto (anos)	Exemplos
4	50	Estruturas de edifícios e outras estruturas correntes

Como já se viu antes admitiu-se que o betão é da classe C20/25 e o aço da classe A 500 NR SD. Para fazer o cálculo do recobrimento nominal vai-se, como referência, admitir uma classe de exposição XC1 (Corrosão induzida por carbonatação – Seco ou permanentemente húmido – Quadro 4.1 *EC2*). Para definir esta mesma classe teve-se em atenção o Quadro E.1 N do Anexo E do *EC2* onde se encontram as classes indicativas de resistência, podendo-se verificar que para a classe de exposição XC1 a classe indicativa de resistência é C20/25. De acordo com o Quadro 4.4N do *EC2* que estabelece os valores de recobrimento mínimo, para uma Classe Estrutural S4 (Tempo de vida útil do projeto de 50 anos) e uma classe de exposição XC1 temos que $C_{min} = 15mm$. Como tolerância de execução considerou-se $\Delta C_{dev} = 10mm$. O valor do recobrimento nominal será calculado segundo 2.23 e 2.24.

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev} \quad (2.23.)$$

$$C_{nom} = 15 + 10 = 25mm \quad (2.24.)$$

2.3.3. Armaduras nas vigas

No ponto 9.2 do *EC2* encontram-se as disposições construtivas relativas a vigas para estruturas de betão armado. No ponto 9.2.1.1 (1) do *EC2* refere-se que a área de armadura longitudinal de tração não deverá ser inferior a $A_{s,min}$, dado pela expressão 2.25. No nosso caso o $A_{s,min}$ está calculado em 2.26 e 2.27.

$$A_{s,min} = 0.26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b_t * d \geq 0.0013 * b_t * d \quad (2.25.)$$

$$A_{s,min} = 0.26 * \frac{2.2*10^3}{500*10^3} * 0.30 * 0.54 \geq 0.0013 * 0.30 * 0.54 \quad (2.26.)$$

$$A_{s,min} = 1.853 \text{ cm}^2 \leq 2.106 \text{ cm}^2 \rightarrow 2\emptyset 12 \text{ ou } 3\emptyset 10 \quad (2.27.)$$

Onde:

b_t – Largura média da zona tracionada

No ponto 9.2.1.1 (3) do *EC2* refere-se que a área das secções, quer de armadura de tração quer de armadura de compressão, não deverão ser superiores a $A_{s,max}$, dado por 2.28.

$$A_{s,max} = 0.04 * A_c = 0.04 * 0.30 * 0.60 = 72 \text{ cm}^2 \quad (2.28.)$$

Como se sabe, as vigas segundo o *eixo x* recebem uma carga muito superior à das vigas segundo o *eixo y*. É também de notar que as vigas segundo o *eixo x* dos pisos de cobertura, por estarem a receber uma carga muito menor, não necessitariam do mesmo tipo de armadura, no entanto por simplificação vai-se optar por uniformizar as armaduras usadas em todas as vigas do modelo.

Por forma a se obter as armaduras das vigas segundo o *eixo x* far-se-á uma aproximação do momento máximo a que estarão sujeitas pela expressão 2.29.

$$\frac{p * l^2}{8} \quad (2.29.)$$

Obtém-se assim por 2.30, 2.31, e 2.32 o momento fletor reduzido.

$$\begin{aligned} p_{\text{vigas}} &= 1.35 * ((0.30 * 25 + 1.5 + 1.5) * 3 + 0.3 * 0.6 * 25 + 8) + 1.50 * (2 * 3) \\ &= 68.4 \text{ Kn/m} \end{aligned} \quad (2.30.)$$

$$M_{Rd} = \frac{p \text{ vigas} \cdot 5^2}{8} = 213.75 \text{ Kn.m} \quad (2.31.)$$

$$\mu_{\text{vigas}} = \frac{M_{Rd}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{213.75}{0.30 \cdot 0.54^2 \cdot \frac{(20 \cdot 10^3)}{1.5}} = 0.183 \quad (2.32.)$$

Na Tabela1_C12_C90_S500 para Flexão Simples (Barros, H. e Figueiras. J (2010)) obtém-se a armadura necessária a colocar na viga (Quadro 2.17). Para secções retangulares simplesmente armadas tem-se a percentagem mecânica de armadura ($\tilde{\omega}$) e, portanto, a armadura necessária, demonstrado por 2.33 e 2.34.

Quadro 2.17 – Extrato da Tabela Tabela1_C12_C90_S500 para Flexão Simples (Barros, H. e Figueiras. J (2010))

μ	$\tilde{\omega}$
0.180	0.201
0.183	0.2046
0.185	0.207

$$\tilde{\omega} = 0.2046 = \frac{A_s}{b \cdot d} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{A_s}{0.30 \cdot 0.54} \cdot \frac{500 \cdot 10^3 / 1.15}{20 \cdot 10^3 / 1.5} \quad (2.33.)$$

$\tilde{\omega}$ – Percentagem mecânica de armadura

$$A_s = 10.165 \text{ cm}^2 \rightarrow 3\emptyset 25 \text{ ou } 4\emptyset 20 > 2\emptyset 12 \quad (2.34.)$$

Tem-se então como armadura principal (longitudinal de tração) 4 varões de 20mm de diâmetro (4 \emptyset 20) e como armadura construtiva 2 varões de 10mm de diâmetro (2 \emptyset 10), tal como se encontra representado na Figura 5.

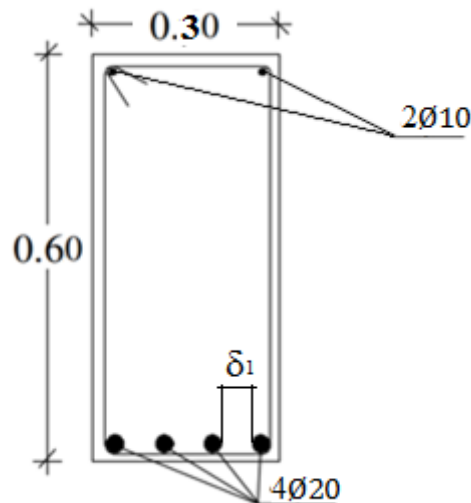


Figura 5 – Armadura das Vigas segundo o eixo x (Corte Transversal)

A distância do eixo das armaduras às faces da viga são as apresentadas em 2.35 e 2.36, sendo que nos cálculos dos recobrimentos foram considerados varões Ø6.

$$\delta \text{ dos } 4\text{Ø}20 \text{ à face da viga} = \frac{0.020}{2} + 0.006 + 0.025 = 0.041 \text{ m} \quad (2.35.)$$

$$\delta \text{ dos } 2\text{Ø}10 \text{ à face da viga} = \frac{0.010}{2} + 0.006 + 0.025 = 0.036 \text{ m} \quad (2.36.)$$

Vai ainda verificar-se os espaçamentos entre as armaduras inferiores para conferir que estes serão aceitáveis. Por norma os espaçamentos existentes entre as faces das armaduras longitudinais deverão ser superiores a 5cm, caso contrário tem de se mudar as disposições das armaduras, optar por armaduras de maior diâmetro ou fazer um agrupamento das armaduras. Neste caso esse espaçamento será ligeiramente superior sendo portanto aceitável como está verificado em 2.37.

$$\delta 1 = \frac{0.30 - 4 \cdot 0.020 - 2 \cdot 0.006 - 2 \cdot 0.025}{3} \cong 0.05267 \text{ m} > 0.05 \text{ m} \quad OK \quad (2.37.)$$

Utilizando o mesmo procedimento para dimensionar armaduras das vigas segundo o *eixo y*, obtemos por 2.38, 2.39 e 2.40 o momento fletor reduzido.

$$p_{\text{vigas}} = 1.35 \cdot 0.30 \cdot 0.60 \cdot 25 = 6.075 \text{ Kn/m} \quad (2.38.)$$

$$M_{\text{Rd}} = \frac{p_{\text{vigas}} \cdot 5^2}{8} = 18.984 \text{ Kn.m} \quad (2.39.)$$

$$\mu_{\text{vigas}} = \frac{M_{\text{Rd}}}{b \cdot d^2 \cdot f_{\text{cd}}} = \frac{18.984}{0.30 \cdot 0.54^2 \cdot \frac{(20 \cdot 10^3)}{1.5}} = 0.0163 \quad (2.40.)$$

Recorrendo mais uma vez à tabela Tabela1_C12_C90_S500 (Flexão Simples) do livro “Tabelas e Ábacos de Dimensionamento” obtém-se a percentagem mecânica de armadura (Quadro 2.18) e, portanto, a armadura necessária, demonstrado por 2.41 e 2.42.

Quadro 2.18 – Extrato da Tabela Tabela1_C12_C90_S500 (Flexão Simples) do livro “Tabelas e Ábacos de Dimensionamento”

μ	$\tilde{\omega}$
0.015	0.015
0.016	0.016
0.020	0.020

$$\tilde{\omega} = 0.016 = \frac{A_s}{b \cdot d} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{A_s}{0.30 \cdot 0.54} \cdot \frac{500 \cdot 10^3 / 1.15}{20 \cdot 10^3 / 1.5} \quad (2.41.)$$

$$A_s = 0.795 \text{ cm}^2 \leq A_{s, \text{min}} = 2.106 \text{ cm}^2 \rightarrow 2\emptyset 12 \quad (2.42.)$$

Considera-se para as vigas segundo o *eixo y* as armaduras que se encontram representadas na Figura 6, como armadura principal (longitudinal de tração) 2 varões de 12mm de diâmetro (2Ø12) e como armadura construtiva 2 varões de 10mm de diâmetro (2Ø10).

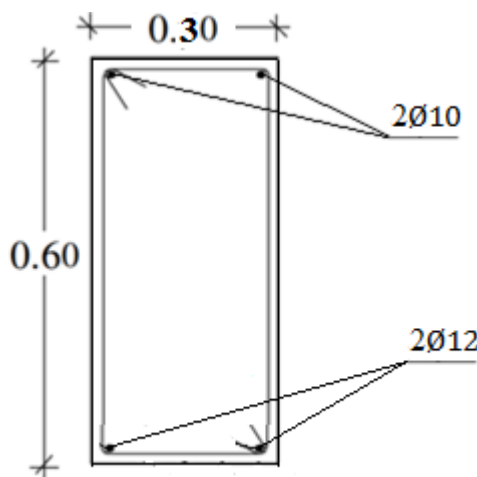


Figura 6 – Armadura das Vigas segundo *eixo y* (Corte Transversal)

A distância do eixo das armaduras às faces da viga são as apresentadas em 2.43 e 2.44.

$$\delta \text{ dos } 2\phi 12 \text{ à face da viga} = \frac{0.012}{2} + 0.006 + 0.025 = 0.037 \text{ m} \quad (2.43.)$$

$$\delta \text{ dos } 2\phi 10 \text{ à face da viga} = \frac{0.010}{2} + 0.006 + 0.025 = 0.036 \text{ m} \quad (2.44.)$$

No ponto 9.2.2 do *EC2* encontram-se as disposições construtivas para as armaduras de esforço transversal das vigas. No entanto, como estas armaduras não serão consideradas, todos os efeitos provocados pelas mesmas são desprezados e a sua representação nos cortes apresentados é apenas esquemática.

2.3.4. Armaduras nos pilares

No ponto 9.5 do *EC2* encontram-se as disposições construtivas relativas aos pilares para estruturas de betão armado. No ponto 9.5.2 (2) do *EC2* refere-se que a área total de armadura longitudinal não deverá ser inferior a $A_{s, \min}$, dado pela expressão 2.45.

$$A_{s, \min} = \frac{0.10 \cdot N_{ed}}{f_{yd}} \geq 0.002 \cdot A_c \quad (2.45.)$$

Para um modelo 3D com 12 pisos os esforços nos apoios que se obteve após fazer o cálculo em Evolution foram os previamente apresentados nos Quadro 2.9 e 2.10. Logo, no caso de estudo e tendo em conta a situação mais gravosa temos $A_{s, \min}$ dado por 2.46 e 2.47.

$$A_{s, \min} = \frac{0.10 \cdot 3529}{500 \cdot 10^3 / 1.15} \geq 0.002 \cdot 0.50^2 \quad (2.46.)$$

$$A_{s, \min} = 8.12 \text{ cm}^2 \geq 5 \text{ cm}^2 \rightarrow 5\phi 16 \text{ ou } 8\phi 12 \quad (2.47.)$$

Para o cálculo da armadura nos pilares foram determinados os valores reduzidos do esforço normal (v) e do momento fletor (μ) para os apoios exteriores e para os interiores, os quais são dados pelas expressões 2.48 e 2.49 e estão apresentados nos Quadros 2.19 e 2.20.

$$v = \frac{NR_d}{b \cdot h \cdot f_{cd}} \quad (2.48.)$$

$$\mu = \frac{MR_d}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} \quad (2.49.)$$

Quadro 2.19 – Valores reduzidos do esforço normal (v) e do momento fletor (μ) (com incrementos)

Tipos de Apoios	Exteriores	Interiores
ν	0.663	1.059
μ	0.0159	≈ 0

Quadro 2.20 – Valores reduzidos do esforço normal (ν) e do momento fletor (μ) (sem incrementos)

Tipos de Apoios	Exteriores	Interiores
ν	0.679	1.026
μ	0.0135	≈ 0

Recorrendo à tabela Tabela3_C12_C50_S500 (Flexão Composta) do livro “*Tabelas e Ábacos de Dimensionamento*” para secções retangulares simetricamente armadas obtém-se a percentagem mecânica de armadura ($\tilde{\omega}$) e, portanto, a armadura necessária nos pilares. No Quadro 2.21 apresentam-se as várias combinações obtidas.

Quadro 2.21– Combinações de Esforços

ν	μ	$\tilde{\omega}$
0.663	0.0159	0
0.679	0.0135	0
1.059	≈ 0	0

Portanto colocar-se-ão em todos os pilares o A_s, min obtido na expressão 2.47. Atendendo às disposições construtivas do EC2, foi considerado um pilar com 8 varões de 12mm de diâmetro (8Ø12) como está representado na Figura 7.

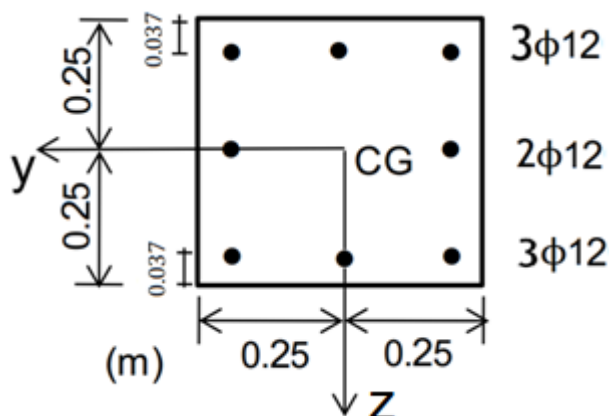


Figura 7 – Armadura dos Pilares (Corte Transversal)

A distância do eixo das armaduras às faces do pilar são as apresentadas na equação 2.50.

$$\delta \text{ dos } 8\emptyset 12 \text{ à face dos pilares} = \frac{0.012}{2} + 0.006 + 0.025 = 0.037 \text{ m} \quad (2.50.)$$

No ponto 9.5.3 do *EC2*, encontram-se as disposições para armaduras transversais nos pilares. Refere-se que o diâmetro das armaduras transversais (cintas, laços ou armaduras helicoidais) não deverá ser inferior a 6mm ou a um quarto do diâmetro máximo dos varões longitudinais. Todas as cintagens, para facilitar a modulação estrutural, não foram contabilizadas na análise.

2.3.5. Armaduras nas lajes

No ponto 9.3 do *EC2* encontram-se as disposições para armaduras em lajes maciças. No entanto, as armaduras presentes nas lajes não foram consideradas no nosso cálculo por simplificação do modelo numérico, sendo dispensado o seu efeito, o qual poderia muito possivelmente fazer aumentar as divergências nas variações em estudo.

3

Gráficos Comparativos de Modelos Com ou Sem Análise Incremental

3.1. NOTA INTRODUTÓRIA

3.1.1. OBJETIVOS

Neste capítulo far-se-á um estudo comparativo onde se pretendem tirar algumas conclusões sobre a influência que os faseamentos construtivos terão nos valores obtidos do cálculo estrutural. Para isso, e partindo do modelo descrito no Capítulo 2, construir-se-ão uma série de modelos com características idênticas nos quais se basearão os estudos. Numa primeira fase os modelos serão analisados sem considerar o faseamento construtivo, ou seja, apenas será introduzido um incremento na sua programação. De seguida far-se-á uma análise incremental respeitando a ordem adotada no modelo descrito no Capítulo 2, retratando o faseamento construtivo presente no processo construtivo convencional de uma estrutura porticada de betão. De referir que na análise feita no decorrer do presente capítulo não foram considerado os fenómenos diferidos no betão nem foram introduzidas as armaduras.

Normalmente, durante a construção de uma determinada estrutura, temos faseamentos construtivos que seguem uma certa sequência ao longo do seu tempo de vida. É sabido, por exemplo, que as betonagens são feitas com algum intervalo de tempo, suficiente para haver uma consolidação do betão nessas zonas da estrutura. Assim os esforços na estrutura seguem também uma determinada sequência temporal. Desta forma, rapidamente se conclui que no final existirá uma certa diferenciação de esforços entre a primeira situação em que se faz um cálculo da estrutura toda de uma só vez (sem qualquer faseamento construtivo) e uma segunda situação em que se submete a estrutura a um cálculo sequencial pré-definido e que melhor representa uma situação existente em obra.

Como já se referiu no Capítulo 2 o objetivo passa não só por analisar a diferenciação de esforços mas também quantificar a sua variação e evolução com o número de faseamentos construtivos considerados.

3.1.2. MODELOS EM ANÁLISE

Partindo do modelo descrito previamente no Capítulo 2, construir-se-á um conjunto de seis modelos bidimensionais (2D) e outros seis tridimensionais (3D). Os modelos 2D e 3D serão equivalentes em termos de características, carregamento e número de pisos. Os seis modelos 2D, todos com as mesmas dimensões mas com um diferente número de pisos, encontram-se representados na Figura 8 e têm dimensões semelhantes aos pórticos segundo o eixo x do modelo inicial. Na mesma figura está representada, como exemplo, a deformada do modelo 2D com 10 pisos. O modelo inicial está

desenhado a preto e a sua respetiva deformada a cor vermelha com uma escala adequada para permitir uma fácil visualização da mesma.

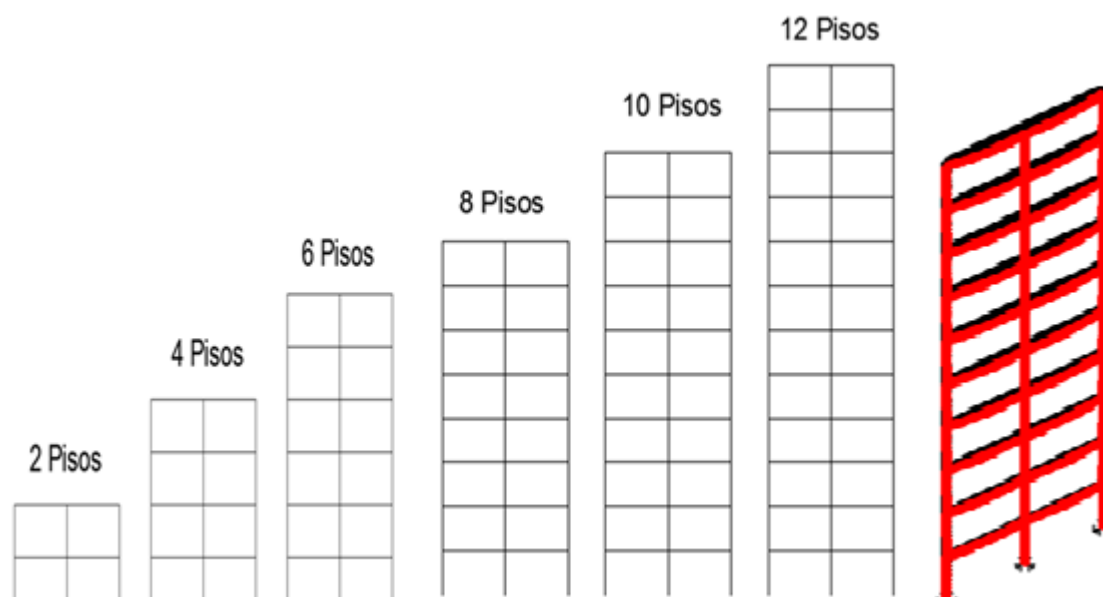


Figura 8 – Conjunto dos 6 Modelos 2D (Deformada a Vermelho no Modelo de 10 Pisos)

Representa-se na Figura 9 o modelo, através de uma imagem obtida no programa de cálculo Evolution, mostrando a respetiva deformada, a qual se encontra representada a vermelho. Como se pode ver pela figura, as vigas segundo o eixo x são as que apresentam maior deformação pois, tal como foi já antes referido, as lajes são unidireccionais segundo o eixo y transferindo a carga para estas vigas.

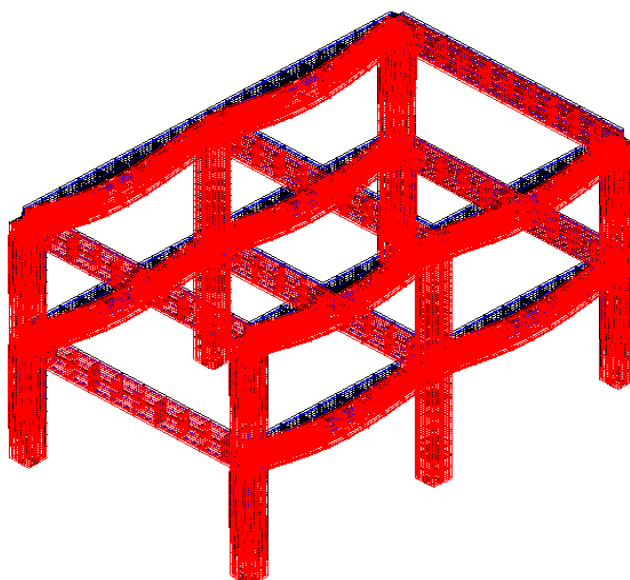


Figura 9 - Modelo 3D de 2 Pisos (Deformada a Vermelho)

3.1.3. ESFORÇOS EM ANÁLISE

Pode-se constatar que a morfologia estrutural e os carregamentos atribuídos são simétricos em todos os modelos em estudo pelo que será espetável que todos os resultados obtidos sejam também simetricamente idênticos. Pode-se verificar que os modelos 2D apresentam um eixo de simetria, enquanto que os modelos 3D apresentam 2 planos de simetria. De notar que a análise se centrará sobre os resultados obtidos nos 2 primeiros pisos de cada modelo, pelo que vai-se centrar a análise de todos os modelos apenas nas secções representadas a vermelho na Figura 10, as quais estão exemplificadas para os modelos com 2 pisos. Todos os outros resultados presentes nestes modelos se obtêm por simples simetria, sendo que apenas as vigas segundo o eixo y não serão analisadas porque os esforços por elas suportados são muito reduzidos.

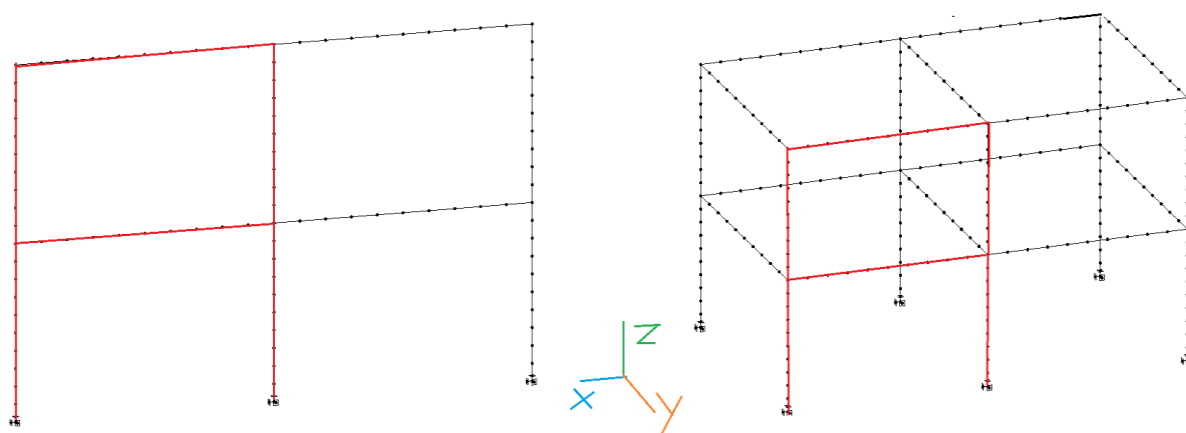


Figura 10 – Demonstração das secções analisadas (a vermelho)

Tanto para a análise dos faseamentos construtivos como para todas as posteriores análises a fazer, vamos retirar de cada um dos modelos 2D e 3D um conjunto pré-estabelecido de resultados. Pretende-se incidir a análise nos resultados estruturais seguintes:

- Reações Verticais (RV) nos apoios exteriores e interiores;
- Momentos segundo eixo y nos apoios exteriores (M_y);
- Deslocamentos segundo eixo z dos pontos intermédios das vigas segundo o eixo x (a_{max});
- Tensões tangenciais na direção z (τ_{xz}) nas secções exteriores das vigas;
- Tensão normal (σ_x) nas fibras superiores da secção central das vigas;
- Tensão normal (σ_x) nas fibras inferiores da secção central das vigas.

Com o cálculo de todos os modelos em estudo foram obtidos os valores das reações para cada um dos seis graus de liberdade em cada apoio. Quando se trata de modelos 2D, apenas três graus de liberdade precisam de ser considerados, os outros serão evidentemente zero, mas apenas as reações verticais e os M_y nos apoios exteriores serão relevantes, razão pela qual apenas estes foram consideradas no estudo. Quando se trata de modelos 3D precisa de contabilizar-se os seis graus de liberdade mas devido às disposições construtivas apenas os dois graus de liberdade referidos anteriormente serão relevantes. Na Figura 11 vê-se um pormenor de um dos apoios com a representação das reações em estudo.

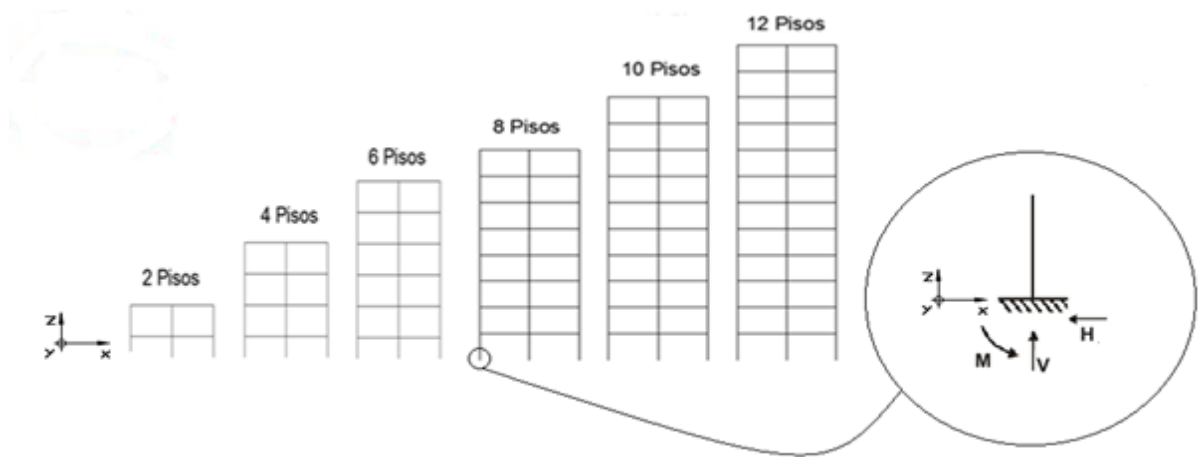


Figura 11 – Pormenor das reações ao nível de um apoio (esforços horizontais pouco significativos)

Vão também analisar-se os deslocamentos segundo eixo z dos pontos intermédios das vigas segundo o eixo x (a_{\max}) uma vez que os deslocamentos nas outras direções não terão tanta relevância e não faz sentido portanto serem aqui avaliados.

Por fim, far-se-á a análise das tensões nas secções indicadas acima. Uma vez que tensões e extensões para este caso são diretamente proporcionais considerando-se uma deformação elástica, nos gráficos que mostram a variação em módulo apenas estão representadas as tensões, a partir das quais se chega facilmente às extensões. Obviamente que tanto para tensões e extensões a variação em termos percentuais será a mesma. Na Figura 12 vemos uma representação esquemática obtida em Evolution de um dos elementos das vigas utilizado, sobre o qual estão representados as três tensões consideradas, designadamente a tensão normal (σ_x) e tensões tangenciais nas direções y (τ_{xy}) e z (τ_{xz}).

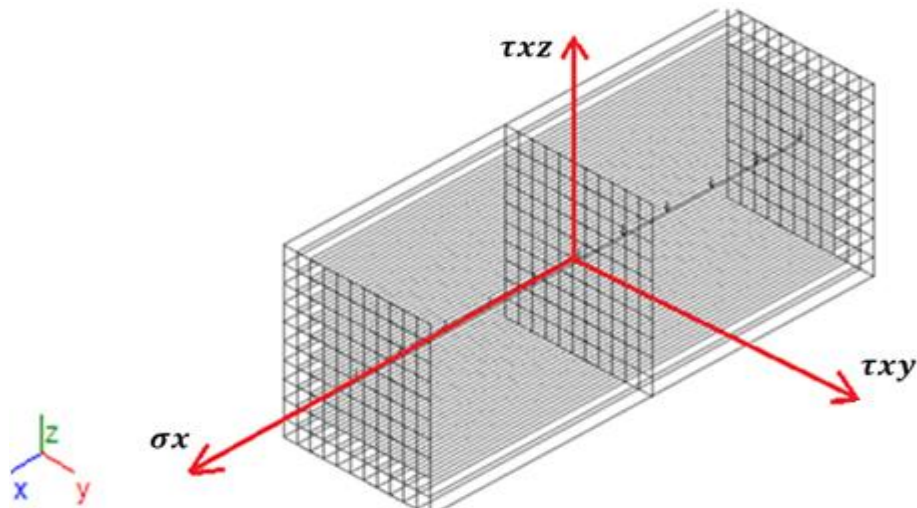


Figura 12 – Indicação das 3 tensões consideradas

Para os vários modelos em estudo tem-se que $\tau_{xy} \approx 0$ e portanto não será considerada. Nas secções exteriores das vigas (zona das ligações viga - pilares exteriores) vamos analisar a tensão τ_{xz} , sendo constante ao longo de toda a secção (apenas varia ao longo do eixo x). Para as secções intermédias

das vigas encontram-se valores significativos para a tensão normal (σ_x), variável ao longo da secção segundo o eixo z. Por esse motivo vão-se analisar as tensões normais (σ_x) nas fibras superiores e inferiores da secção central das vigas.

3.2. ANÁLISES PARAMÉTRICAS

3.2.1. INTRODUÇÃO

Vai aqui apresentar-se um conjunto de gráficos reproduzindo os resultados obtidos nas análises efetuadas, onde se pretende expor a influência que terão os faseamentos construtivos nos esforços previamente referidos. O eixo x de todos os gráficos diz respeito ao nº de pisos do modelo considerado (2 a 12 Pisos) para modelos 2D e 3D.

Em todos os gráficos apresentados optou-se por uma análise comparativa ao invés de uma apresentação dos resultados no seu valor bruto, facilitando assim a visualização gráfica. Como exemplo temos que, considerando-se uma análise incremental, o valor das reações nos apoios interiores dos modelos 2D foram 751.68KN nos de 2 pisos e 3954.11KN nos de 12 pisos. Neste mesmo modelo de 12 pisos tivemos uma diferença em módulo entre as duas situações consideradas (com e sem análise incremental) de 175.73KN, dado pela expressão 3.1. Tendo em conta que a maior diferença entre as duas situações é logicamente registada nos modelos de 12 pisos, ter-se-iam gráficos em que as variações máximas (Δs) que se pretendem mostrar seriam de cerca de 5% em relação às variações de valores que o gráfico representaria, tal como demonstrado em 3.2. Este facto levaria a que, apresentando-se aqui os valores brutos obtidos, ter-se-ia uma sobreposição dos gráficos praticamente total para as duas situações, o que seria pouco inteligível principalmente tendo em conta que o que se pretende é uma análise comparativa entre as duas situações consideradas.

$$\Delta s = 3954.114 - 3778.388 = 175.73 \text{ KN} \quad (3.1.)$$

$$\frac{\Delta s}{3954.11 - 751.68} = 0.0549 \quad (3.2.)$$

Para cada resultado em estudo vão apresentar-se gráficos que demonstram a evolução registada para as duas situações das diferenças em módulo, obtidas segundo 3.3 e também em termos percentuais, obtidas segundo 3.4. Com a apresentação destes dois tipos de variações ter-se-á uma ideia da ordem de grandeza dos esforços obtidos, e conseguir-se-á fazer a análise comparativa que se pretende.

$$Modelo2 - Modelo1 \text{ [KN ; KN.m ; KPa]} \quad (3.3.)$$

$$\frac{Modelo2 - Modelo1}{Modelo1} * 10^2 \text{ [%]} \quad (3.4.)$$

Conjunto 1;

Modelo1 – Resultado obtido no modelo simulado sem análise incremental

Modelo2 – Resultado obtido no modelo simulado com análise incremental (incrementos introduzidos segundo a sequencia apresentada no Capítulo 2)

3.2.2. REAÇÕES NOS APOIOS

Fazendo-se desde já uma generalização para todos os gráficos que foram obtidos neste capítulo, tem-se como primeira observação que os esforços nos modelos 2D e 3D acompanham os mesmos tipos de variações, embora nos modelos 2D com diferentes expressividades, as quais tenderão a ser maiores se o modelo considerado tiver um maior número de pisos. Comparando os modelos 2D com os 3D facilmente se verifica que as variações são menos substanciais nos modelos 3D

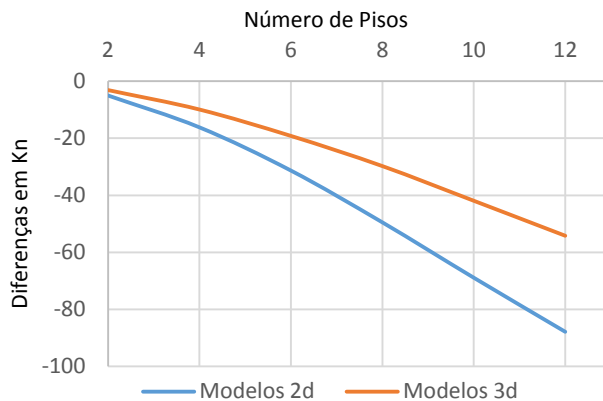


Figura 13 – RV nos Apoios Exteriores

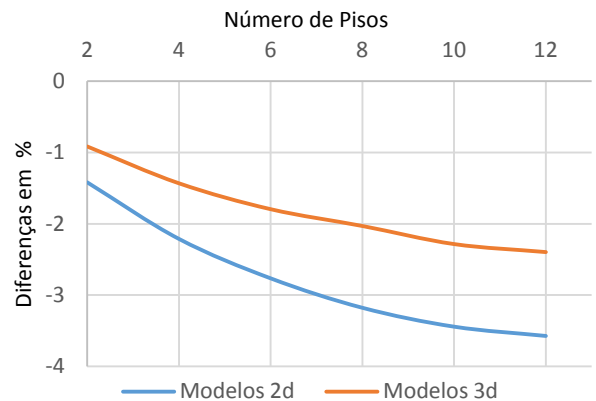


Figura 14 – RV nos Apoios Exteriores

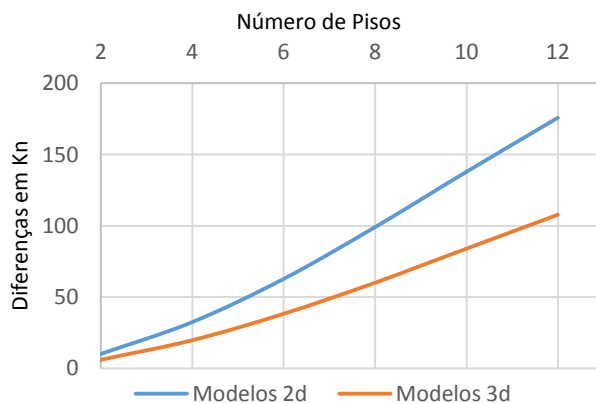


Figura 15 – RV nos Apoios Interiores

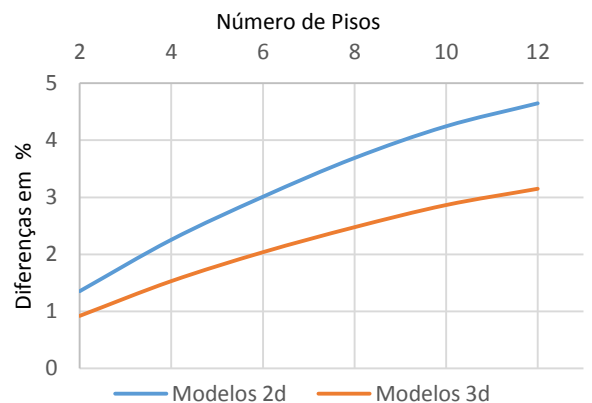


Figura 16 – RV nos Apoios Interiores

Analisando-se as RV (Reações Verticais) ao nível dos apoios vê-se que os modelos com uma análise incremental, apresentam uma RV menor nos apoios exteriores e maior nos interiores. À medida que se vai aumentando no nº de pisos considerados as diferenças em módulo são cada vez mais significativas, como o demonstram as Figuras 13 e 14. Nos mesmos pode-se identificar um crescimento ligeiramente exponencial para essas diferenças, no entanto há uma tendência para haver uma estabilização do seu aumento percentual com o aumento do nº de pisos, como o demonstram as Figuras 15 e 16. As maiores diferenças em termos percentuais não ultrapassam os 5%, valor que já é bastante significativo tendo em conta a ordem de grandeza dos valores obtidos nas RV.

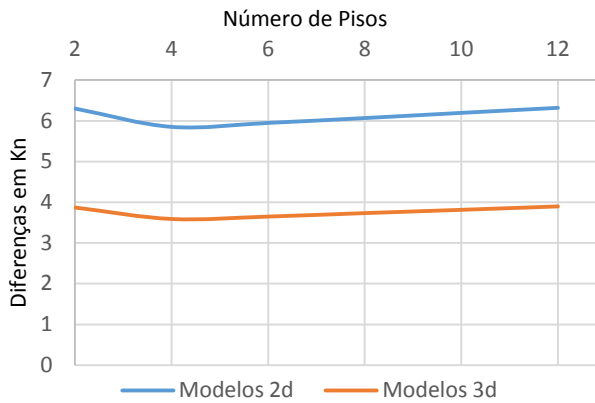


Figura 17 – M_y nos Apoios Exteriores

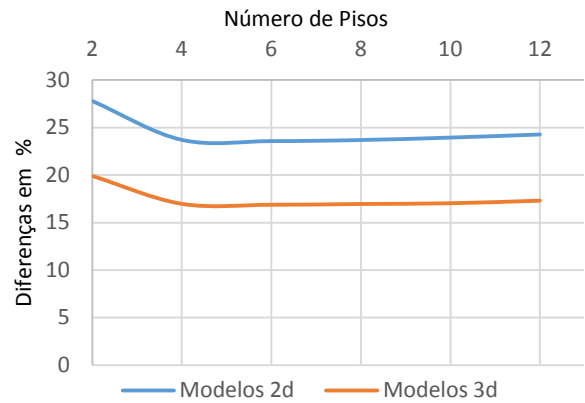


Figura 18 – M_y nos Apoios Exteriores

Nos gráficos respeitantes aos M_y (momentos segundo o *eixo y*) verificou-se que os valores registados são pouco consideráveis. Concluímos que o M_y não sofre grandes alterações mantendo-se constante, mesmo com o aumento do nº de pisos do modelo (Figuras 17 e 18), sendo que o M_y registado é menor no caso de termos apenas um incremento.

Apesar de tudo as maiores variações percentuais nas reações dos apoios deram-se precisamente nos M_y que registaram uma variação superior a 25% logo no modelo 2D de 2 Pisos, enquanto que nas RV a maior diferença percentual foi menor que 5%, sendo no entanto uma variação bastante significativa pois, pelo Figura 15 pode ver-se que a maior diferença em módulo foi de 175kN. Já nos M_y essa diferença não passa dos 7kN.m segundo a Figura 17.

3.2.3. DESLOCAMENTOS DOS PONTOS INTERMÉDIOS DAS VIGAS

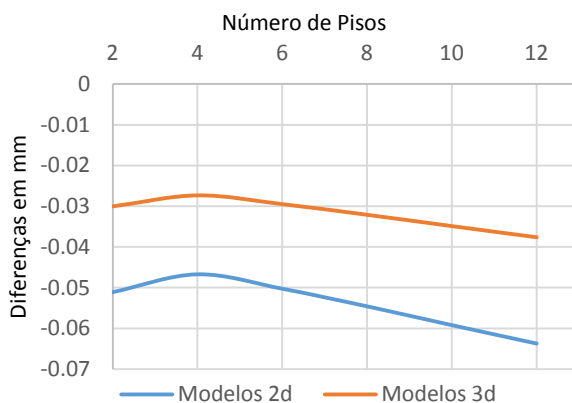


Figura 19 – a_{\max} na Viga do 1º Piso

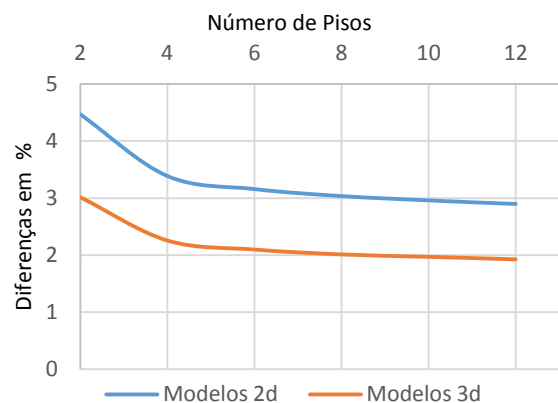


Figura 20 – a_{\max} na Viga do 1º Piso

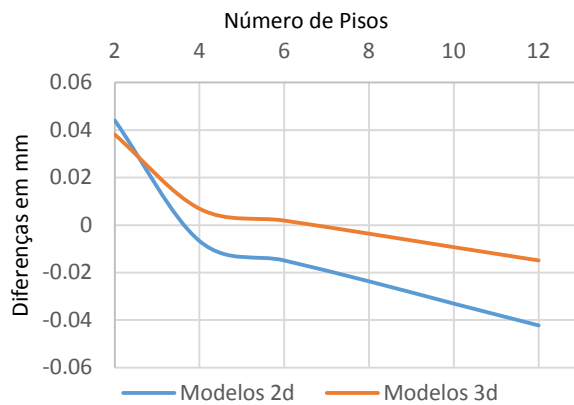


Figura 21 – a_{\max} na Viga do 2º Piso

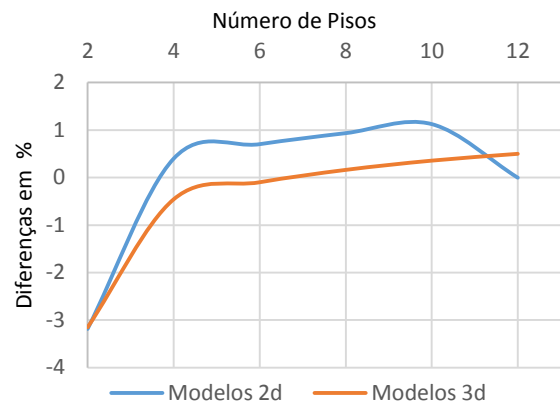


Figura 22 – a_{\max} na Viga do 2º Piso

Em edifícios correntes, a flecha de uma viga em relação aos seus apoios (deformação que ocorre depois da construção desses elementos), determinadas para a combinação de ações quase permanentes (Ψ_2), não deve exceder $a_{\max} = 1/250$ para não danificar os elementos não estruturais suportados por essas vigas. No nosso caso o a_{\max} nos pontos analisados, registou-se para a viga do 2º Piso no modelo 2D de 12 Pisos e foi cerca de -3.37mm. A flexa máxima instantânea está portanto verificada como se demonstra em 3.5.

$$a_{\max} = \frac{1}{250} = \frac{5}{250} = 0.02m \geq 0.00337m \quad (3.5.)$$

Através da análise destes gráficos pode verificar-se que a diferença registadas no a_{\max} de cada uma das vigas é sempre inferior a 5% sendo que para as duas vigas em estudo registou-se a maior variação percentual nos modelos de 2 pisos, como o demonstram os Figuras 20 e 22. Quanto à viga do 2º Piso registam-se variações percentuais praticamente nulas no caso dos modelos com mais de 2 pisos, ou seja o deslocamento registado para modelos com ou sem análise incremental será sensivelmente o mesmo. Os deslocamentos registados foram sempre menores no caso dos modelos sem análise incremental com uma exceção para o a_{\max} na Viga do 2º Piso nos modelos de 2 pisos, verificando-se pois uma inversão de sinal nos Gráficos A.9 e A.10. As diferenças em módulo verificadas nos vários deslocamentos são praticamente constantes como o demonstram as Figuras 19 e 21.

3.2.4. TENSÕES NORMAIS E TANGENCIAIS

Os seguintes gráficos representam as tensões tangenciais na direção do eixo z (τ_{xz}) das secções exteriores das vigas (zona das ligações viga - pilares exteriores) e a tensão normal (σ_x) nas fibras superiores e inferiores. Estes gráficos são de análise mais complexa e não apresentam tanta regularidade como os gráficos obtidos anteriormente para outro tipo de parâmetros sendo que, por vezes, os dados obtidos se tornam dispersos e pouco conclusivos. No entanto é possível a deteção de determinadas tendências que nos podem levar a algumas conclusões de interesse.

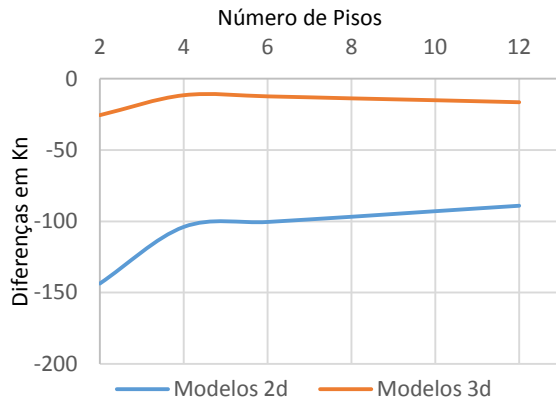


Figura 23 – τ_{xz} nas Vigas do 1º Piso

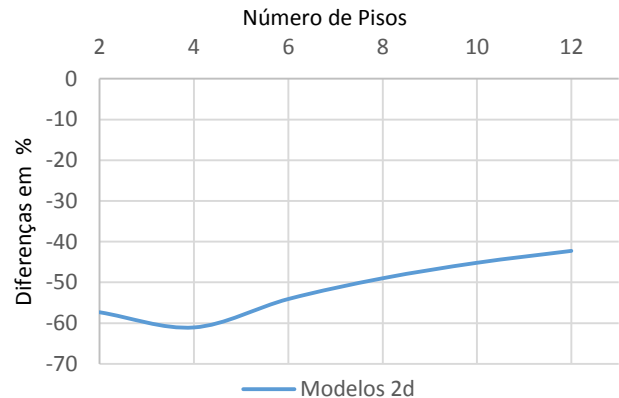


Figura 24 – τ_{xz} nas Vigas do 1º Piso

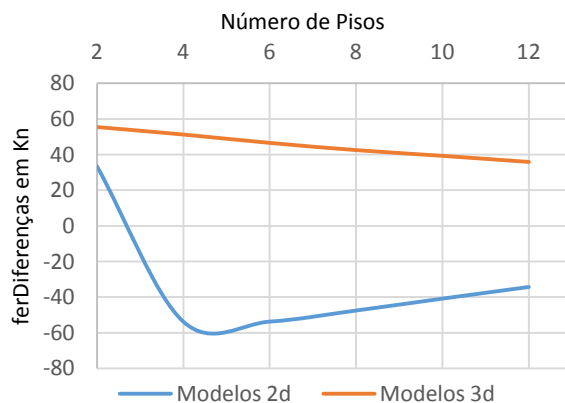


Figura 25 – τ_{xz} nas Vigas do 2º Piso

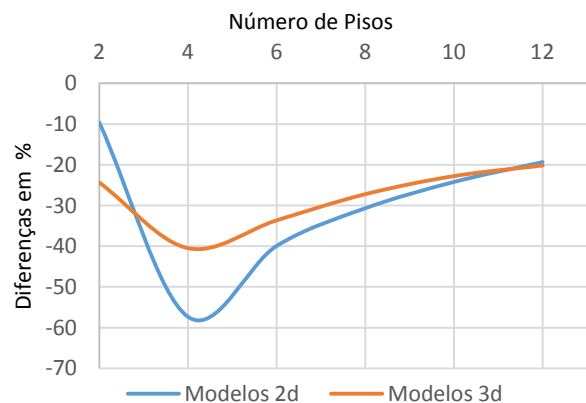


Figura 26 – τ_{xz} nas Vigas do 2º Piso

Quanto às tensões tangenciais na direção do eixo z (τ_{xz}) temos que os modelos com análise incremental apresentam em módulo e por norma tensões tangenciais mais reduzidas.

Analisando o gráfico das τ_{xz} na ligação pilar-viga do 1º Piso temos variações bastante regulares sendo que as maiores diferenças em módulo se deram para modelos de 2 pisos (Figura 23). Optou-se por não representar a variação percentual de modelos 3D (Figura 24) atendendo ao facto de termos valores para as τ_{xz} próximos de 0 o que levaria a desfasamentos deste gráfico algo irrealistas.

Quanto às τ_{xz} na ligação pilar-viga do 2º Piso temos tensões tangenciais negativas em todos os modelos 3D e no modelo 2D de 2 pisos. O valor destas tensões estará relacionado com a relação de

esforços entre as cargas provenientes da viga (provocando tensões negativas) e as provenientes do pilar acima da mesma (provocando tensões positivas). Desta forma no modelo 2D de 2 pisos temos tensões negativas por se tratar de uma viga de topo, sendo que para o modelo de 4 pisos as τ_{xz} registadas já são positivas aumentando de valor com o nº de pisos do modelo considerado. A grande variação da diferença registada nos modelos 2D entre os 2 e 4 pisos dá-se precisamente por ter havido essa inversão de sinal (Figuras 25 e 26).

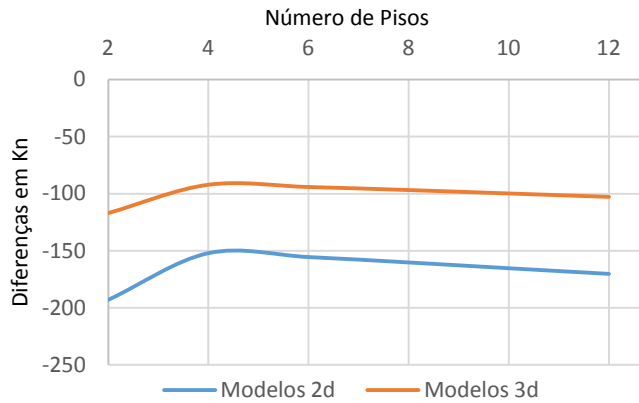


Figura 27 – σ_x nas fibras superiores das vigas do 1ºPiso

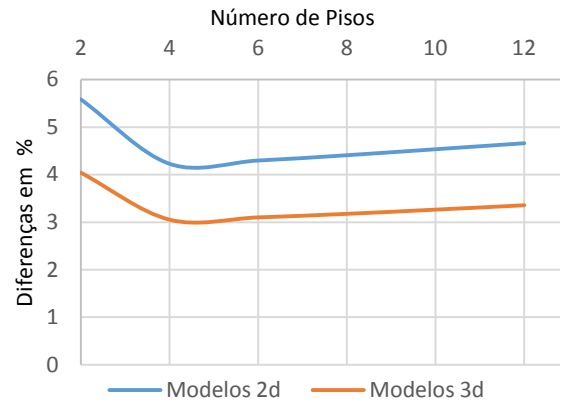


Figura 28 – σ_x nas fibras superiores das vigas do 1ºPiso

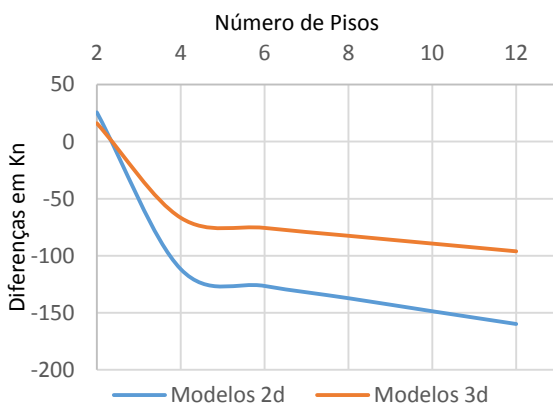


Figura 29 – σ_x nas fibras superiores das vigas do 2ºPiso

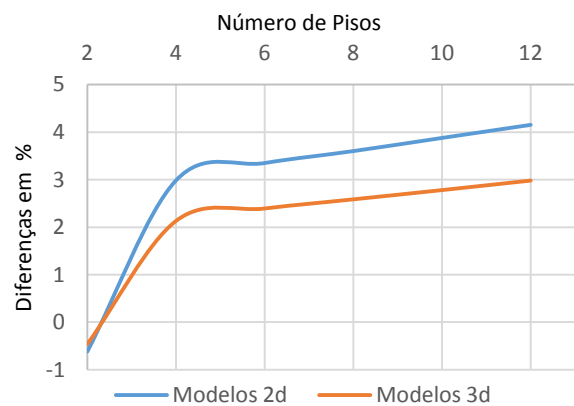


Figura 30 – σ_x nas fibras superiores das vigas do 2ºPiso

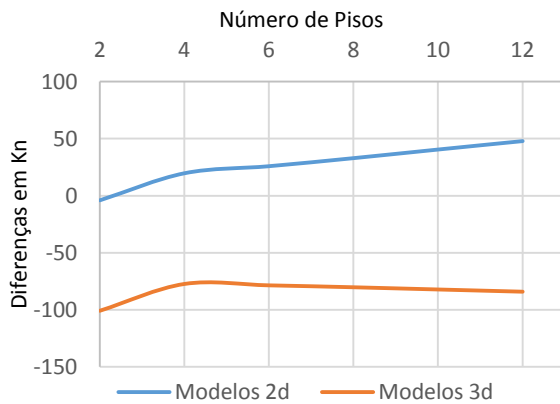


Figura 31 – σ_x nas fibras inferiores das vigas do 1ºPiso

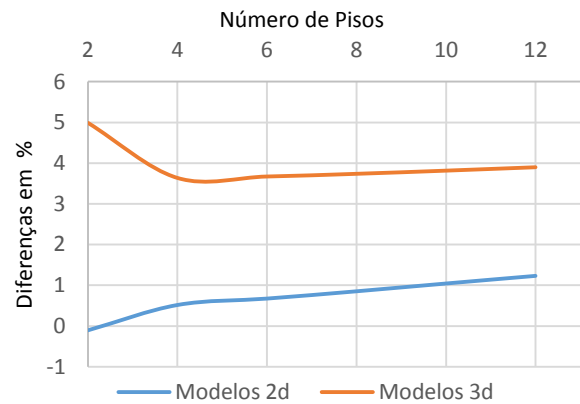


Figura 32 – σ_x nas fibras inferiores das vigas do 1ºPiso

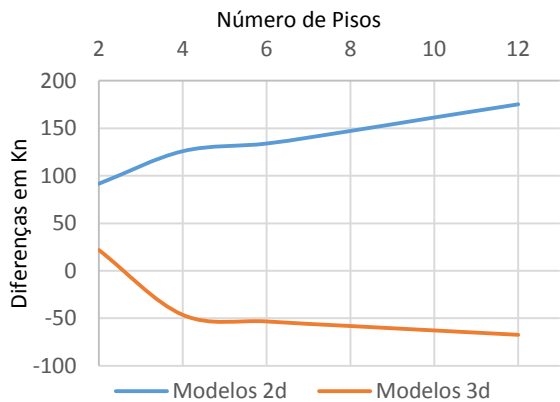


Figura 33 – σ_x nas fibras inferiores das vigas do 2ºPiso

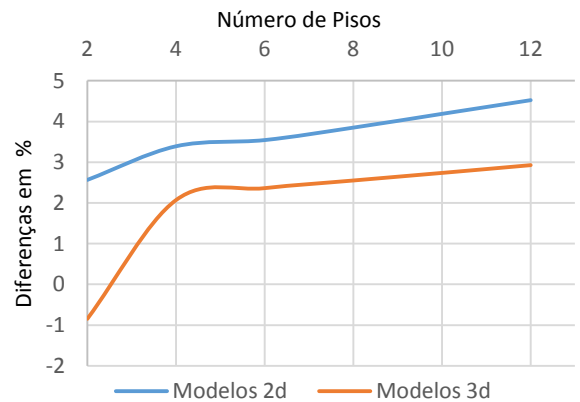


Figura 34 – σ_x nas fibras inferiores das vigas do 2ºPiso

Nos gráficos da tensão normal (σ_x) na secção intermédia das vigas temos, como esperado, valores negativos nas fibras superiores (compressões) e positivos nas inferiores (trações). As diferenças registadas em termos de percentagem em todos os esforços praticamente não supera os 5%. Podemos ver nas Figuras 30 e 34 que nos modelos de 2 pisos temos diferenças praticamente nulas, ou seja, entre modelos com ou sem análise incremental não há grande diferença até porque estas vigas dizem respeito a um dos últimos incrementos introduzidos. Também as maiores variações se registam quando passamos de modelos com 2 para 4 pisos pois os esforços experimentados nas vigas do 1º e 2º piso serão mais irregulares um modelos com apenas 2 pisos, havendo depois uma uniformização das variações registados com modelos de mais pisos (Figuras 27, 29, 31 e 33).

4

Gráficos Comparativos de Modelos Sujeitos a Retração e/ou Fluência Com ou Sem Introdução de Armaduras

4.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo estudar a influencia nos resultados estruturais da introdução de efeitos diferidos no betão. Até agora tem-se estudado apenas modelos inteiramente constituídos por betão, ou seja, sem a introdução das armaduras nos vários elementos estruturais. A retração e fluência são dois fenómenos que atuam diretamente sobre o betão no entanto para estudar a influência destes fenómenos nos resultados estruturais torna-se pertinente que se modelem também as armaduras, as quais contrariam os referidos fenómenos. O dimensionamento das armaduras colocadas foi já feita no Capítulo 2, no qual se teve em conta as normas presentes no *EC2*.

Esta análise paramétrica foi numa primeira fase feita com a introduzindo de fluência, retração, ou as duas a atuar em simultâneo, sendo que nos modelos com os dois efeitos diferidos a atuar em conjunto foi feita uma colocação de armaduras exatamente para evidenciarmos os efeitos que estes fatores terão nos vários resultados. De referir ainda que a retração e fluência são dois fenómenos que ocorrem em simultâneo, pelo que se torna pertinente o tratamento conjunto dos mesmos sendo a sua correta quantificação muito difícil porque existem muitos fatores que interferem no seu cálculo. Admite-se como válido o princípio da sobreposição de efeitos para tensões aplicadas em instantes diferentes, pelo qual é possível calcular as extensões para os efeitos diferidos do betão para tensões aplicadas em diferentes incrementos.

4.2. ANÁLISES PARAMÉTRICAS

4.2.1. INTRODUÇÃO

Vai-se aqui representar dois conjuntos de gráficos que demonstram a evolução das diferenças, em termos de módulo e percentual, da influência dos vários efeitos diferidos e também das armaduras, sendo que o que se pretende é verificar as diferenças entre as diversas situações aqui consideradas.

Mais uma vez para cada resultado em estudo vão apresentar-se gráficos que demonstram a evolução das diferenças registadas nas duas situações em módulo, obtidas segundo 4.1 e também em termos percentuais, obtidas segundo 4.2.

$$Modelo2;3;4 - Modelo1 \quad [KN ; KN.m ; KPa] \quad (4.1.)$$

$$\frac{Modelo2;3;4 - Modelo1}{Model1} * 10^2 \quad [\%] \quad (4.2.)$$

Conjunto 2;

Modelo1 – Esforço obtido no modelo simulado apenas com um incremento sem armadura

Modelo2 – Esforço obtido no modelo simulado com fluência sem armadura

Modelo3 – Esforço obtido no modelo simulado com retração sem armadura

Modelo4 – Esforço obtido no modelo simulado com fluência e retração sem armadura

Conjunto 3;

Modelo1 – Esforço obtido no modelo simulado apenas com um incremento sem armadura

Modelo2 – Esforço obtido no modelo simulado com fluência e retração sem armadura

Modelo3 – Esforço obtido no modelo simulado com fluência e retração e com armaduras

4.2.2. REAÇÕES NOS APOIOS

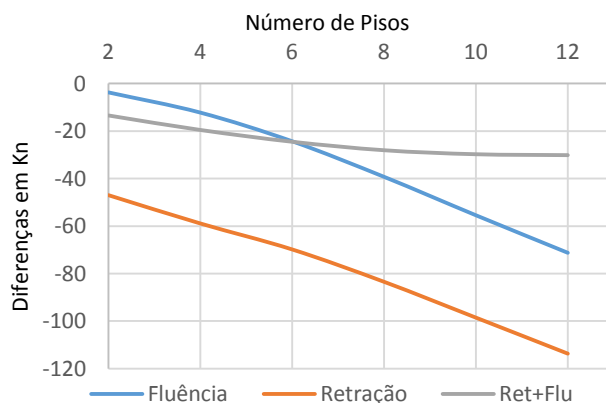


Figura 35 – RV nos Apoios Exteriores

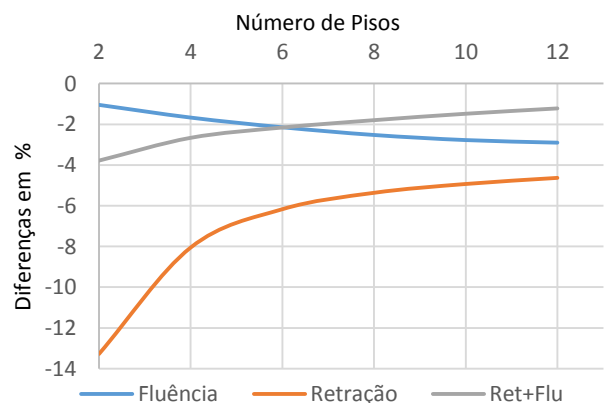


Figura 36 – RV nos Apoios Exteriores

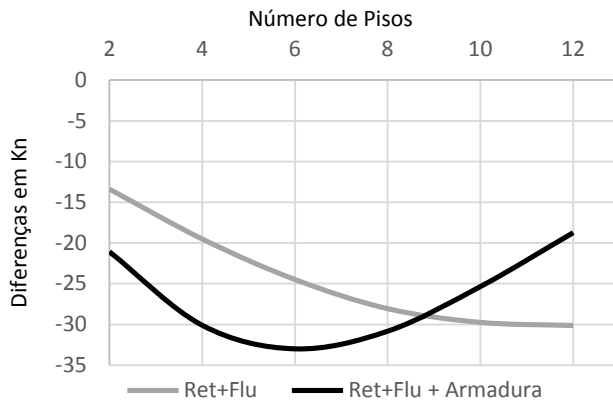


Figura 37 – RV nos Apoios Exteriores

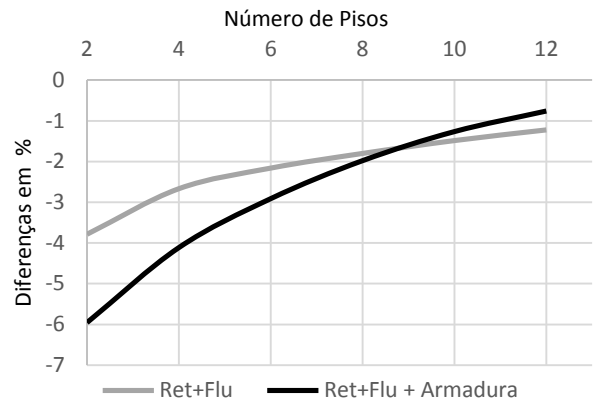


Figura 38 – RV nos Apoios Exteriores

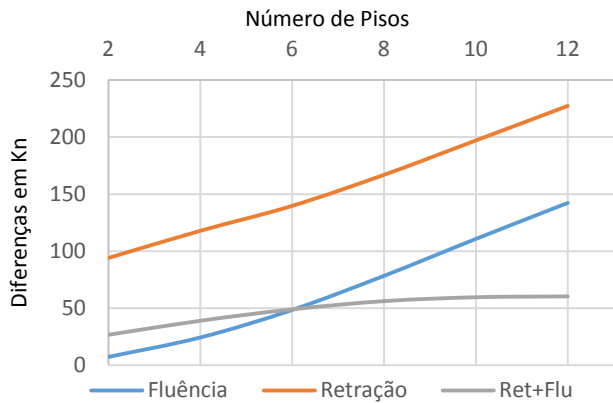


Figura 39 – RV nos Apoios Interiores

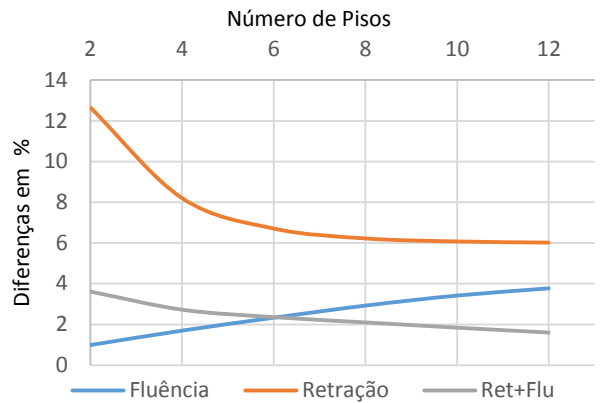


Figura 40 – RV nos Apoios Interiores

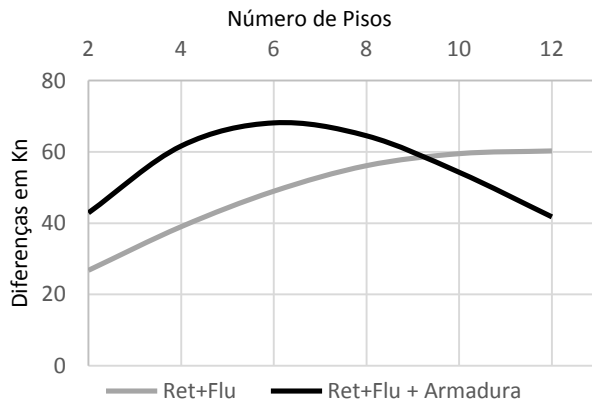


Figura 41 – RV nos Apoios Interiores

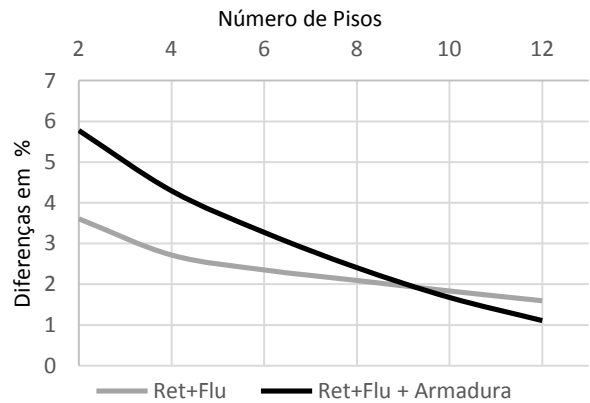


Figura 42 – RV nos Apoios Interiores

Nos gráficos que mostram as diferenças nas reações verticais (RV) nos apoios exteriores e interiores entre os modelos com e sem armaduras (fluência e retração) as diferenças registadas começam por ser maiores nos modelos com armaduras mas para os modelos com maior número de pisos a situação inverte-se tal como podemos ver nos Figuras 37, 38, 41 e 42. Isto poderá estar relacionado com o facto

dos efeitos diferidos no betão se desenvolverem ao longo do tempo e portanto nos modelos com maior nº de pisos como o tempo de atuação dos mesmos é superior leva também a que haja uma maior diferenciação de esforços.

As diferenças em K_n de modelos com retração e fluência vão seguindo os mesmos tipos de variações, no entanto podemos reparar pelas Figuras 35, 36, 39 e 40 que nos modelos com retração temos uma grande diferença nas R_V logo para os modelos de 2 pisos, sendo que percentualmente são mesmo estes os modelos com maiores variações. Isto poderá estar relacionado com o facto da fluência desenvolver-se ao longo de um período mais prolongado de tempo enquanto que uma parcela importante da retração (retração autogénia) se desenvolve durante o endurecimento do betão. De notar que o endurecimento do betão começa poucas horas após o seu fabrico e atinge aos 28 dias de idade cerca de 60 a 90% da sua resistência final, dependendo do tipo cimento e do tipo de cura utilizado.

Quanto aos modelos com efeito combinado de fluência e retração foram os que registaram menores variações, sendo que para os esforços obtidos nas R_V o seu efeito, quando combinado, parece anular-se.

4.2.3. DESLOCAMENTOS DOS PONTOS INTERMÉDIOS DAS VIGAS

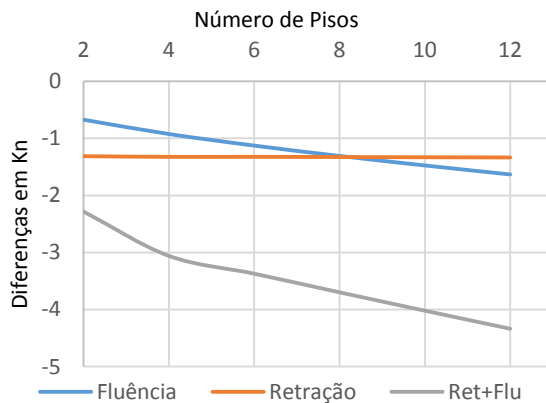


Figura 43 – a_{\max} na Viga do 1º Piso

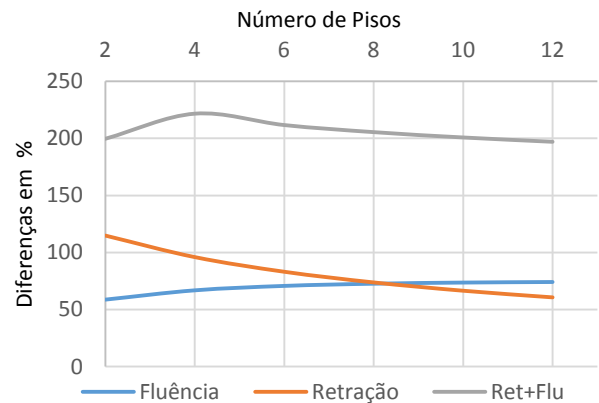


Figura 44 – a_{\max} na Viga do 1º Piso

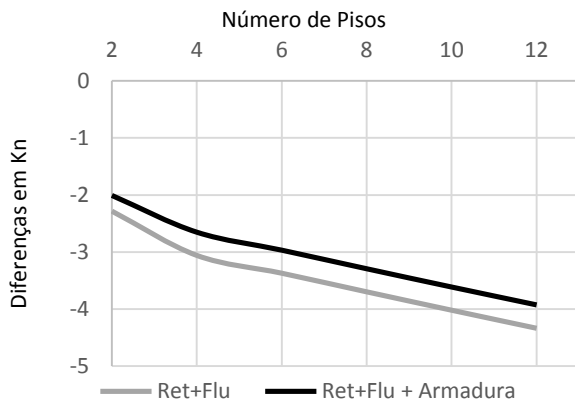


Figura 45 – a_{\max} na Viga do 1º Piso

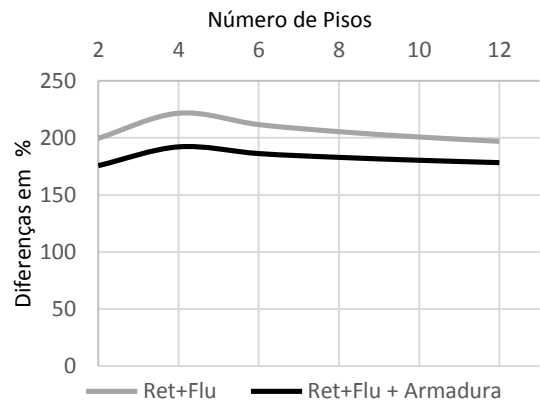


Figura 46 – a_{\max} na Viga do 1º Piso

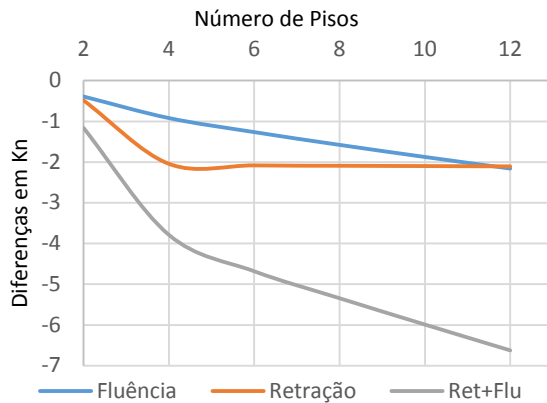


Figura 47 – a_{\max} na Viga do 2º Piso

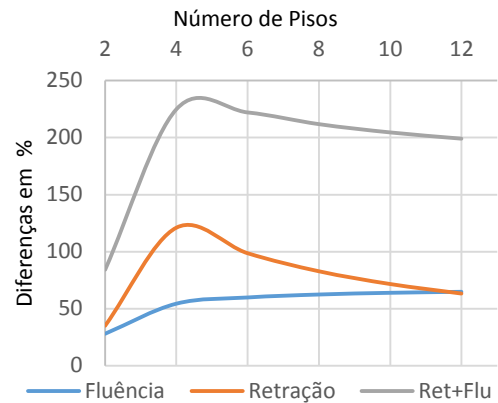


Figura 48 – a_{\max} na Viga do 2º Piso

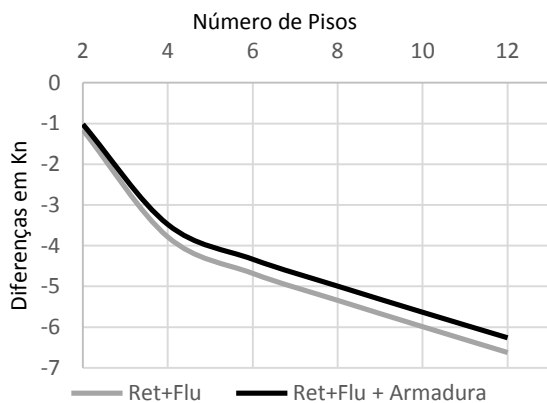


Figura 49 – a_{\max} na Viga do 2º Piso

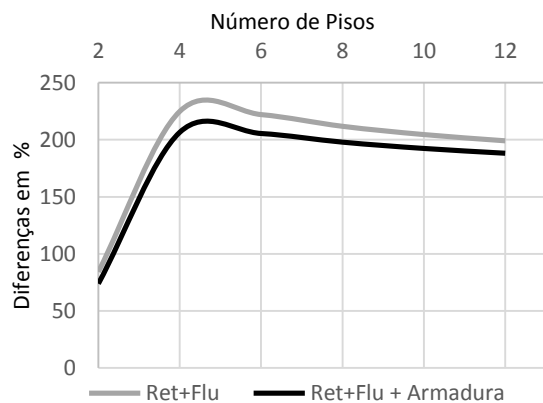


Figura 50 – a_{\max} na Viga do 2º Piso

Viu-se no Capítulo 3 que, determinado para a combinação de ações quase permanentes (Ψ_2), o a_{\max} nas vigas não deverá exceder $l/250$. No nosso caso o a_{\max} nos pontos analisados para estas situações, registou-se para a viga do 2º Piso no modelo de 12 Pisos com fluência e retração a atuar em simultâneo, sendo de -9.95mm. A flexa máxima está portanto verificada como se demonstra em 4.3.

$$a_{\max} = \frac{1}{250} = \frac{5}{250} = 0.02m \geq 0.00995m \quad (4.3.)$$

Verifica-se que a diferença registadas no a_{\max} de cada uma das vigas nos modelos com os efeitos diferidos a atuar de forma combinada é maior que nos modelos com retração e fluência a atuarem de forma separada, sendo que estes efeitos parecem somar-se, aumentando o a_{\max} registado, quando atuam em conjunto (Figuras 43, 44, 47 e 48).

Quanto às armaduras conclui-se uma vez mais que o seu efeito faz diminuir ligeiramente as variações registadas nos momentos (Figuras 45, 46, 49 e 50).

4.2.4. TENSÕES NORMAIS E TANGENCIAIS

Os seguintes gráficos representam as tensões tangenciais na direção do eixo z (τ_{xz}) na extremidade das vigas (zona das ligações viga - pilares exteriores) e a tensão normal (σ_x) nas fibras superiores e inferiores da secção central das vigas.

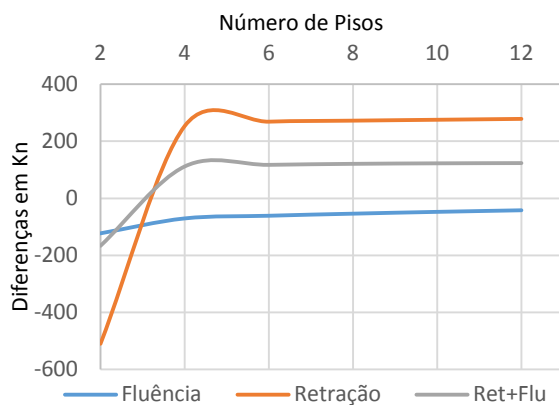


Figura 51 – τ_{xz} nas Vigas do 1º Piso

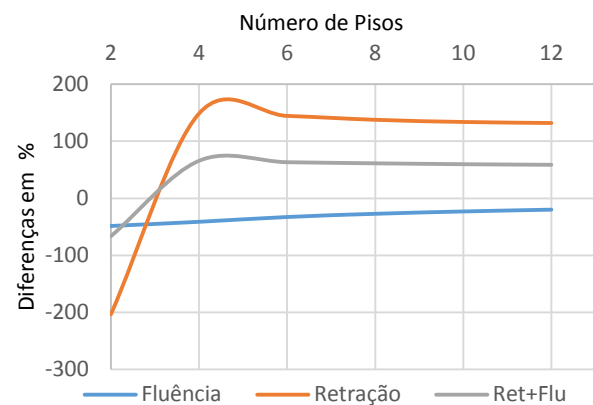


Figura 52 – τ_{xz} nas Vigas do 1º Piso

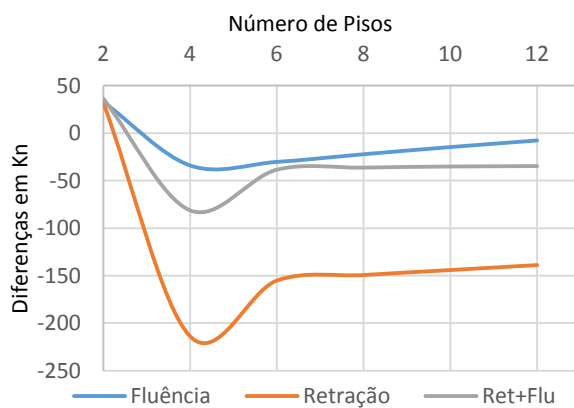


Figura 53 – τ_{xz} nas Vigas do 2º Piso

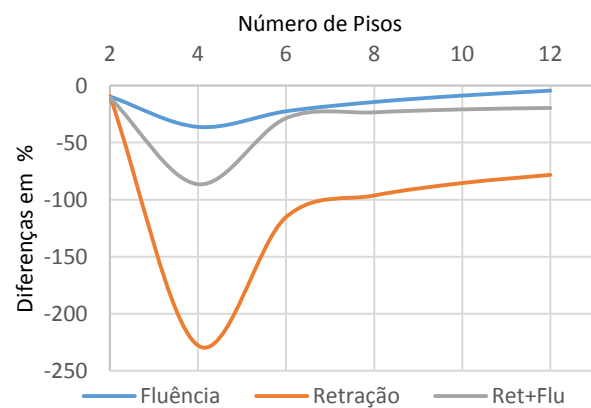


Figura 54 – τ_{xz} nas Vigas do 2º Piso

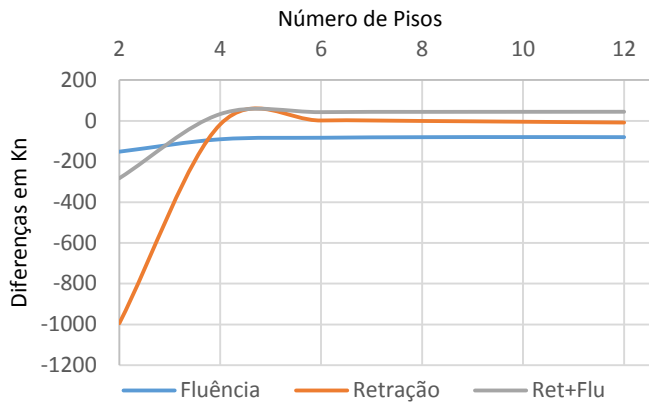


Figura 55 – σ_x nas fibras superiores das vigas do 1º Piso

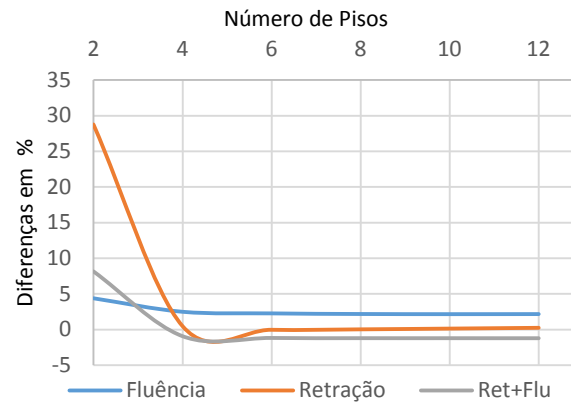


Figura 56 – σ_x nas fibras superiores das vigas do 1º Piso

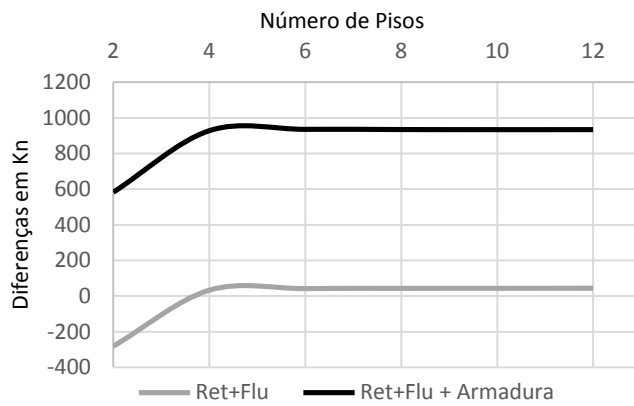


Figura 57 – σ_x nas fibras superiores das vigas do 1º Piso

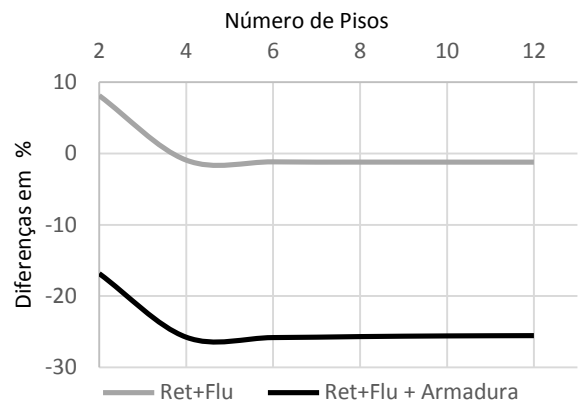


Figura 58 – σ_x nas fibras superiores das vigas do 1º Piso

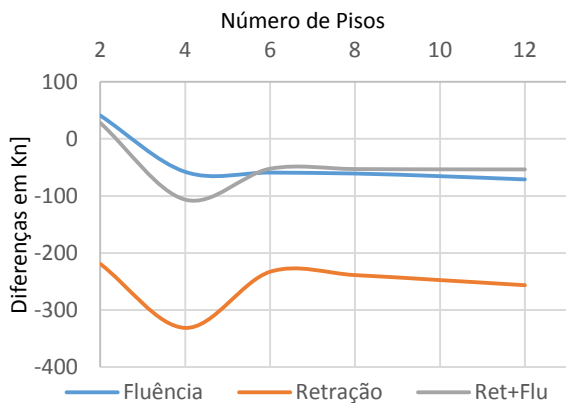


Figura 59 – σ_x nas fibras superiores das vigas do 2º Piso

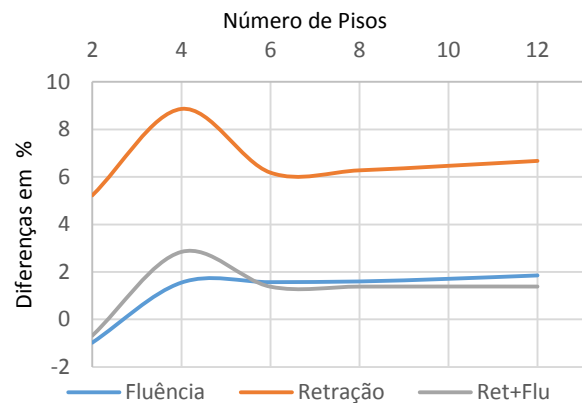


Figura 60 – σ_x nas fibras superiores das vigas do 2º Piso

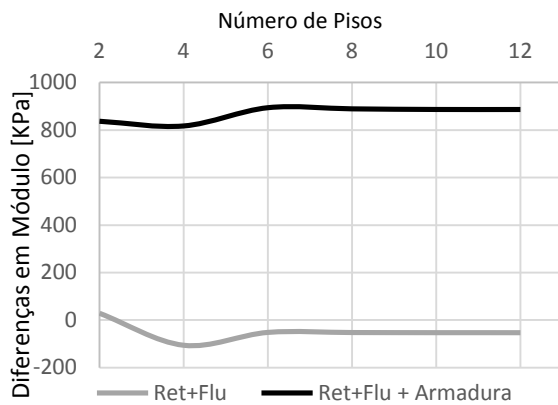


Figura 61 – σ_x nas fibras superiores das vigas do 2ºPiso

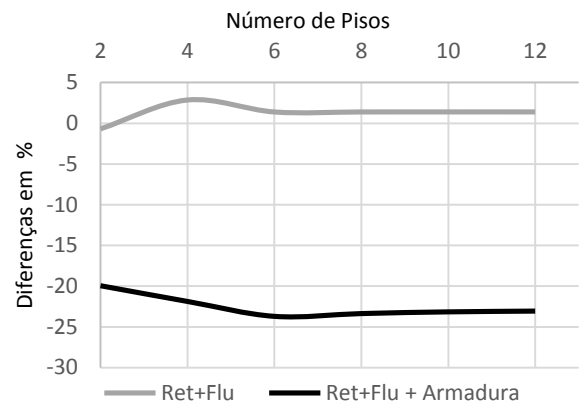


Figura 62 – σ_x nas fibras superiores das vigas do 2ºPiso

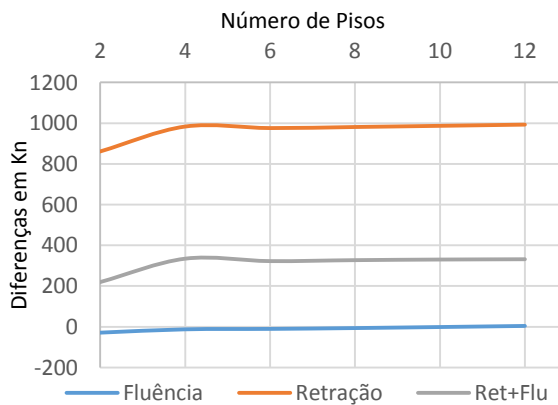


Figura 63 – σ_x nas fibras inferiores das vigas do 1ºPiso

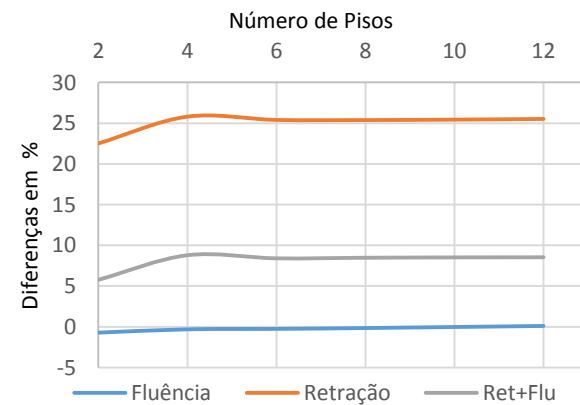


Figura 64 – σ_x nas fibras inferiores das vigas do 1ºPiso

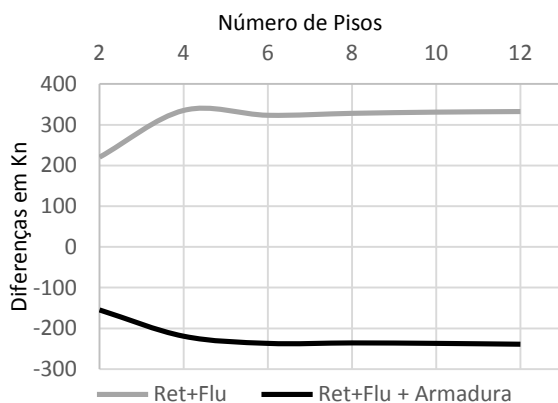


Figura 65 – σ_x nas fibras inferiores das vigas do 1ºPiso

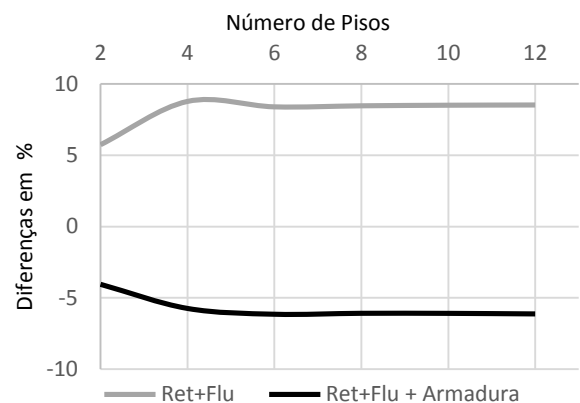


Figura 66 – σ_x nas fibras inferiores das vigas do 1ºPiso

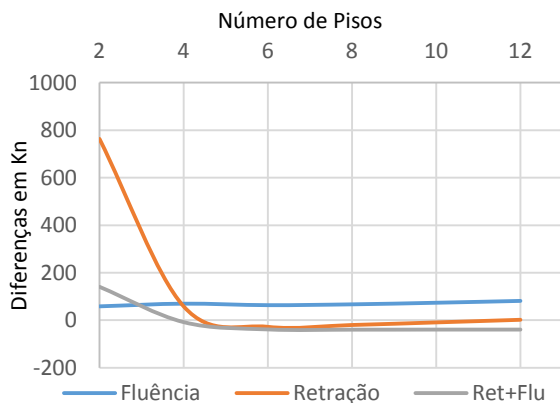


Figura 67 – σ_x nas fibras inferiores das vigas do 2º Piso

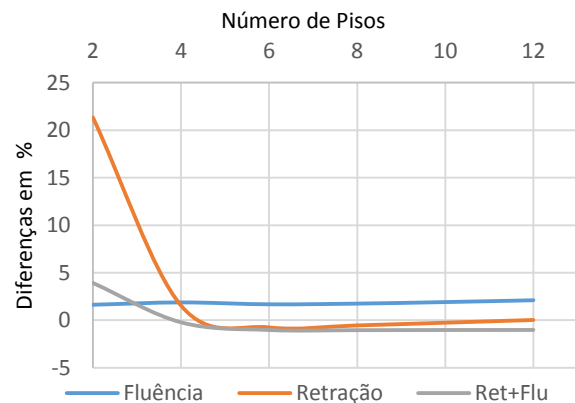


Figura 68 – σ_x nas fibras inferiores das vigas do 2º Piso

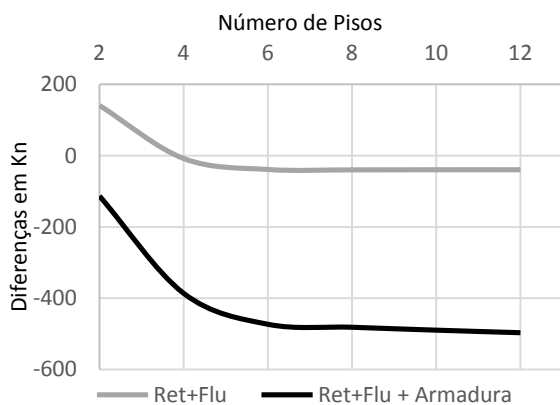


Figura 69 – σ_x nas fibras inferiores das vigas do 2º Piso

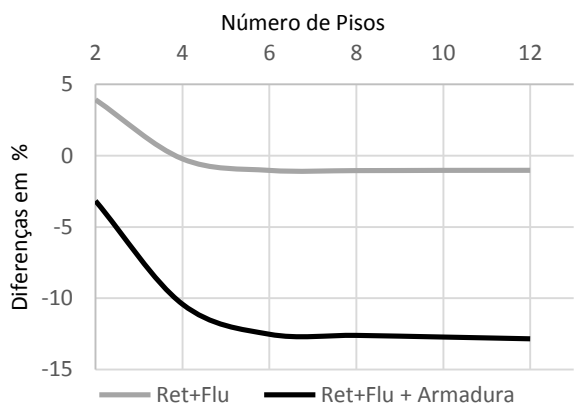


Figura 70 – σ_x nas fibras inferiores das vigas do 2º Piso

Quanto às tensões tangenciais na direção do eixo z (τ_{xz}) temos que os modelos com armadura apresentam tensões tangenciais bem mais elevadas.

Também para as tensões normais (σ_x) temos que os modelos com armadura apresentam tensões mais elevadas à semelhança do que se passou com as τ_{xz} , como se pode ver pelas Figuras 57, 58, 61, 62, 65, 66, 69 e 70.

Para todos os gráficos de tensões tivemos que os modelos apenas com retração são os que apresentam as maiores variações, sendo que nos modelos com fluência essa variação foi praticamente nula. Já nos modelos com os dois efeitos atuando em simultâneo as diferenças nas tensões registadas foram sempre intermédias às dos modelos anteriores, como se pode verificar nos Figuras 51, 52, 53, 54, 55, 56, 59, 60, 63, 64, 67, 68.

5

Notas Finais

5.1. CONCRETIZAÇÃO DOS OBJETIVOS

Considera-se que muitos dos aspetos abordados e resultados obtidos poderiam ter sido alvo de mais exploração. No entanto, pensa-se que os objetivos iniciais propostos na realização da presente tese foram alcançados. Conseguiu-se com este estudo ter uma ideia mais clara sobre a importância da modelação do faseamento construtivo e da consideração de parâmetros como a retração, a fluência e a armadura, estudando-se os resultados obtidos nas várias análises estruturais. Com recurso ao programa *Evolution* conseguiu-se validar, por meio de análises paramétricas, muitas das suposições em relação à verdadeira influência nas estruturas destes tipo de fatores. Foi apresentado ao longo deste trabalho um conjunto de gráficos reproduzindo resultados de análises estruturais onde se variam os referidos parâmetros e onde se pretende expor a influência dos mesmos. Por esse motivo, espera-se que o presente trabalho tenha alguma utilidade na medida em que até ao momento não existem muitos trabalhos com estudos aprofundados e que abordam concretamente este tema.

5.2. ASPETOS QUE PODERIAM SER MELHORADOS

Neste trabalho foram obtidos grandes quantidades de dados os quais não foram detalhadamente analisados. Desta forma, dever-se-á fazer uma análise mais pormenorizada da grande quantidade de dados obtidos. Em alternativa poderão também ser feitos outro tipo de análises paramétricas que estudem, por exemplo, a influência da percentagem de armadura, a influencia da fendilhação ou a influência da consideração das lajes de piso.

BIBLIOGRAFIA

- Eurocódigo 1 – Ações em estruturas. CORRESPONDÊNCIA
Versão portuguesa da EN 1991-1-1:2002 + AC:2009. HOMOLOGAÇÃO e d.-.-. Termo de Homologação n.º 517/2009.
- Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão
Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. CORRESPONDÊNCIA
Versão portuguesa da EN 1992-1-1-2004 + AC:2008. HOMOLOGAÇÃO e d.-.-. Termo de Homologação n.º 27/2010.
- Eurocódigo – Bases para o projeto de estruturas. CORRESPONDÊNCIA
Versão portuguesa da EN 1990:2002 + AC:2008. HOMOLOGAÇÃO, -.-. Termo de Homologação n.º 516/2009 e A. p. N. r. d. r. d. N. E. 1991-1:1999.
- (3), R. L. M. A. J. B. (Outubro de 2012). Otimização do faseamento construtivo de estruturas constituídas por grandes volumes de betão: Estudo do canal do descarregador de cheias de uma barragem. Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2012.
- Azevedo, Á. F. M. (Abril 2003). MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, <http://www.fe.up.pt/~alvaro>.
- Burgos, R. B. (Rio de Janeiro, fevereiro de 2005). Avaliação de Cargas Críticas e Comportamento Pós- Crítico Inicial de Pórticos Planos. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Corrêa2, J. F. M. d. A. P. M. R. S. (Cadernos de Engenharia de Estruturas, n. 19, p. 51-79, 2002). ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS EM CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS A AÇÕES DE CONSTRUÇÃO. São Carlos.
- Costa, A. and J. Appleton (2002). GRUPO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO E PRÉ-ESFORÇADO. Instituto Superior Técnico.
- Ferraz, M. Â. C. (Julho de 2010). Modelo para Avaliação do Comportamento Estrutural de Obras de Arte. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- FEUP (FEUP, Maio de 2002). DIMENSIONAMENTO DE LAJES ARMADAS EM DUAS DIRECÇÕES.
- Figueiras, P. J. A. (2003/2004). Análise e Dimensionamento de Estruturas Porticadas. FEUP DEC/LEC.
- GARCIA, I. L. J. (MARÇO DE 2009). PROJECTO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO COM BASE NA ANÁLISE NÃO LINEAR MATERIAL. FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO.
- Júnior, L. A. G. B. (2009). Desenvolvimento de uma Plataforma Computacional para Análise Via Método dos Elementos Finitos de Estruturas de Concreto Armado Convencional e Reforçado com Fibras de Aço, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

KATAOKA, L. T. (2010). Análise da Deformabilidade por Fluência e Retração e sua Utilização na Monitorização de Pilares de Concreto. São Paulo.

Kripka, M. (Novembro de 1990). Análise Incremental Construtiva de Edifícios. Rio de Janeiro RJ - Brasil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

PINTO, T. C. L. C. (JULHO DE 2011). ADAPTAÇÃO DA PONTE DA ARRÁBIDA À PASSAGEM DO METRO LIGEIRO. FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO.

Póvoas, R. H. C. d. F. (1991). Modelos Não-Lineares de Análise e Dimensionamento. DEC - FEUP.

Rodrigues, H. (2008). Análise de estruturas 3D com o programa SAP2000 – V11.0.4.

Sanches, R. M. G. (Março 2009). ANÁLISE DE PÓRTICOS DE BETÃO ARMADO COM ELEMENTOS FINITOS HÍBRIDOS DE TENSÃO. INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO DE LISBOA.

Barros, H. e Figueiras. J (2010). Tabelas e Ábacos de Dimensionamento de Secções de Betão Solicitadas à Flexão e a Esforços Axiais segundo o Eurocódigo 2. Edições FEUP.

T., L., et al. (Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012 FEUP, 24-26 de outubro de 2012). Análise experimental do efeito da fluência e retração em pilares de concreto armado.

TERRA, N. M. D. S. (JULHO DE 2008). ANÁLISE DAS METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE 2ª ORDEM PREVISTAS NO EUROCÓDIGO 2. FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO.

A

Anexos

PARTE A

Modelo1 – Esforço obtido no modelo simulado apenas com um incremento

Modelo2 – Esforço obtido no modelo simulado com vários incrementos introduzidos segundo a sequencia apresentada no Capitulo 2

Quadro A1 – R_V nos Apoios Exteriores [KN]

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	353.6777	731.5053	1132.66	1556.952	2000.359	2457.806
	Modelo2	348.6582	715.3164	1101.324	1507.448	1931.452	2369.943
3D	Modelo1	335.5966	691.8295	1067.998	1465.82	1836.746	2263.224
	Modelo2	332.5215	681.9195	1048.819	1436.048	1794.788	2208.982

Quadro A2 – Diferenças em Módulo e % das R_V [KN] nos Apoios Exteriores

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Módulo	-5.01949	-16.1889	-31.3364	-49.504	-68.9072	-87.863
	%	-1.41923	-2.21309	-2.76662	-3.17955	-3.44474	-3.57485
3D	Módulo	-3.07509	-9.91004	-19.1781	-29.7715	-41.9585	-54.2413
	%	-0.91631	-1.43244	-1.7957	-2.03105	-2.28439	-2.39664

Quadro A3 – R_V nos Apoios Interiores [KN]

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	741.6446	1434.989	2081.68	2682.095	3244.282	3778.388
	Modelo2	751.6836	1467.367	2144.352	2781.103	3382.096	3954.114
3D	Modelo1	668.3068	1295.341	1882.505	2428	2932.09	3421.102
	Modelo2	674.457	1315.161	1920.861	2488.135	3016.113	3528.903

Quadro A4 – Diferenças em Módulo e % das R_V [KN] nos Apoios Interiores

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Módulo	10.03897	32.37779	62.67288	99.00805	137.8144	175.7259
	%	1.353609	2.256309	3.010688	3.691444	4.247916	4.650817
3D	Módulo	6.150183	19.82008	38.35617	60.13474	84.02334	107.8003
	%	0.920263	1.530105	2.037507	2.476719	2.865647	3.151039

Quadro A5 – M_y [KN.m] nos Apoios Exteriores

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	22.68298	24.67315	25.22102	25.60981	25.87203	26.04126
	Modelo2	28.98773	30.52376	31.16928	31.67839	32.06911	32.36388
3D	Modelo1	19.43719	21.14965	21.61801	22.01658	22.38786	22.51116
	Modelo2	23.30607	24.738	25.26567	25.74897	26.20014	26.40705

Quadro A6 – Diferenças em Módulo e % dos M_y [KN.m] nos Apoios Exteriores

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Módulo	6.304751	5.850615	5.948257	6.068579	6.197081	6.32262
	%	27.79508	23.71248	23.58452	23.6963	23.95282	24.27924
3D	Módulo	3.868879	3.58835	3.647656	3.732392	3.812283	3.895883
	%	19.90451	16.96647	16.87323	16.95264	17.02835	17.30645

Quadro A7 – a_{\max} [mm] na Viga do 1º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	-1.14344	-1.37992	-1.59277	-1.79996	-2.0026	-2.20189
	Modelo2	-1.19454	-1.42665	-1.64304	-1.85456	-2.06182	-2.26563
3D	Modelo1	-0.99676	-1.2126	-1.40808	-1.59848	-1.77471	-1.95864
	Modelo2	-1.02679	-1.23992	-1.43758	-1.63059	-1.80962	-1.9963

Quadro A8 – Diferenças em Módulo e % do a_{\max} [mm] na Viga do 1º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Módulo	-0.0511	-0.04672	-0.05027	-0.0546	-0.05923	-0.06374
	%	4.469095	3.385966	3.156329	3.033544	2.957499	2.894987
3D	Módulo	-0.03003	-0.02732	-0.02949	-0.03212	-0.03491	-0.03766
	%	3.013001	2.253303	2.094637	2.009213	1.967225	1.922742

Quadro A9 – a_{\max} [mm] na Viga do 2º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	-1.38169	-1.68476	-2.10875	-2.52351	-2.92904	-3.32779
	Modelo2	-1.33769	-1.6915	-2.12364	-2.54718	-2.96209	-3.37
3D	Modelo1	-1.20751	-1.49277	-1.88225	-2.26439	-2.61724	-2.98523
	Modelo2	-1.16944	-1.4859	-1.88037	-2.26803	-2.62655	-3.00012

Quadro A10 – Diferenças em Módulo e % do a_{\max} [mm] na Viga do 2º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Módulo	0.043991	-0.00674	-0.01489	-0.02367	-0.03305	-0.04221
	%	-3.18388	0.400349	0.706025	0.938036	1.12827	1.26833
3D	Módulo	0.038072	0.006866	0.001877	-0.00364	-0.00931	-0.01489
	%	-3.15298	-0.45994	-0.09973	0.160693	0.355723	0.498706

Quadro A11 – τ_{xz} [KPa] nas Vigas do 1º Piso

Tipo de Modelo\ Nº Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	250.833	170.2794	185.7609	197.604	205.5936	210.7499
	Modelo2	107.109	66.36119	85.3414	100.8522	112.7571	121.7385
3D	Modelo1	89.36896	22.49059	14.25204	7.937555	0.614386	-1.31655
	Modelo2	63.78283	10.85505	1.819478	-5.90086	-14.5328	-17.8586

Quadro A12 – Diferenças em Módulo e % do τ_{xz} [KPa] nas Vigas do 1º Piso

Tipo de Modelo\ Nº Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Módulo	-143.724	-103.918	-100.419	-96.7518	-92.8365	-89.0114
	%	-57.2987	-61.0281	-54.0585	-48.9625	-45.1553	-42.2356
3D	Módulo	-25.5861	-11.6355	-12.4326	-13.8384	-15.1472	-16.5421
	%	-28.6298	-51.7351	-87.2336	-174.341	-2465.42	1256.474

Quadro A13 – τ_{xz} [KPa] nas Vigas do 2º Piso

Tipo de Modelo\ Nº Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	-347.207	93.82876	134.5353	154.8389	168.4814	177.286
	Modelo2	-313.786	40.05072	80.83869	107.3681	127.6962	143.0323
3D	Modelo1	-227.792	-126.647	-138.363	-156.094	-172.272	-177.524
	Modelo2	-172.312	-75.3988	-91.8288	-113.617	-133.052	-141.733

Quadro A14 – Diferenças em Módulo e % do τ_{xz} [KPa] nas Vigas do 2º Piso

Tipo de Modelo\ Nº Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Módulo	33.4209	-53.778	-53.6966	-47.4708	-40.7852	-34.2538
	%	-9.62565	-57.3151	-39.9127	-30.6582	-24.2075	-19.3212
3D	Módulo	55.47963	51.24839	46.53467	42.47635	39.21945	35.79172
	%	-24.3554	-40.4655	-33.6322	-27.2121	-22.766	-20.1616

Quadro A15 – σ_x nas fibras superiores das vigas do 1º Piso

Tipo de Modelo\ Nº Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	-3456.32	-3601.42	-3623.88	-3639.16	-3649.47	-3656.12
	Modelo2	-3649.36	-3753.65	-3779.55	-3799.56	-3814.91	-3826.49
3D	Modelo1	-2893.88	-3017.02	-3035.72	-3047.93	-3057.94	-3063.26
	Modelo2	-3010.85	-3109.09	-3129.81	-3144.7	-3157.71	-3166.03

Quadro A16 – Diferenças em Módulo e % do σ_x nas fibras superiores das vigas do 1º Piso

Tipo de Modelo\ Nº Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Módulo	-193.032	-152.222	-155.669	-160.395	-165.444	-170.378
	%	5.584894	4.226713	4.295633	4.407466	4.533386	4.660069
3D	Módulo	-116.974	-92.0705	-94.0966	-96.7661	-99.7748	-102.775
	%	4.042129	3.051707	3.099652	3.174814	3.262813	3.355102

Quadro A17 – σ_x nas fibras superiores das vigas do 2º Piso

Tipo de Modelo\ Nº Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	-4198.91	-3738.32	-3772.32	-3806.83	-3830.15	-3845.21
	Modelo2	-4173.15	-3850	-3898.79	-3944.03	-3978.79	-4005.02
3D	Modelo1	-3525.72	-3133.95	-3161.94	-3194.06	-3216.12	-3228.26
	Modelo2	-3509.54	-3200.69	-3237.56	-3276.59	-3305.48	-3324.41

Quadro A18 – Diferenças em Módulo e % do σ_x nas fibras superiores das vigas do 2º Piso

Tipo de Modelo\ Nº Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Módulo	25.75757	-111.682	-126.467	-137.208	-148.64	-159.809
	%	-0.61344	2.987482	3.352488	3.604269	3.880792	4.156047
3D	Módulo	16.1837	-66.74	-75.6187	-82.5323	-89.3588	-96.1525
	%	-0.45902	2.129578	2.391526	2.583934	2.778464	2.978461

Quadro A19 – σ_x nas fibras inferiores das vigas do 1ºPiso

Tipo de Modelo\ Nº Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	3827.941	3814.195	3845.364	3868.202	3883.606	3893.548
	Modelo2	3823.915	3833.862	3871.209	3901.116	3924.069	3941.386
3D	Modelo1	-2021.51	-2128.95	-2141.24	-2149	-2155.48	-2158.89
	Modelo2	-2122.32	-2206.32	-2219.83	-2229.28	-2237.69	-2243.02

Quadro A20 – Diferenças em Módulo e % do σ_x nas fibras inferiores das vigas do 1ºPiso

Tipo de Modelo\ Nº Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Módulo	-4.02571	19.66647	25.8449	32.91443	40.46339	47.83828
	%	-0.10517	0.515613	0.672106	0.850897	1.041902	1.228655
3D	Módulo	-100.808	-77.3733	-78.5817	-80.2781	-82.2087	-84.1352
	%	4.986767	3.634341	3.669908	3.735605	3.813942	3.897158

Quadro A21 – σ_x nas fibras inferiores das vigas do 2ºPiso

Tipo de Modelo\ Nº Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	3576.75	3711.81	3778.953	3821.832	3850.715	3869.356
	Modelo2	3668.441	3837.675	3912.858	3968.967	4012.005	4044.473
3D	Modelo1	-2594.59	-2241.82	-2257.74	-2280.25	-2295.27	-2303.52
	Modelo2	-2572.74	-2288.24	-2311.1	-2338.43	-2358.09	-2370.95

Quadro A22 – Diferenças em Módulo e % do σ_x nas fibras inferiores das vigas do 2ºPiso

Tipo de Modelo\ Nº Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Módulo	91.69144	125.8645	133.9054	147.1351	161.2895	175.1176
	%	2.563541	3.39092	3.543452	3.849858	4.18856	4.525755
3D	Módulo	21.8416	-46.4213	-53.3571	-58.1818	-62.8198	-67.436
	%	-0.84181	2.070697	2.363291	2.551552	2.736921	2.927525

PARTE B

Modelo1 – Esforço obtido no modelo simulado apenas com um incremento

Modelo2 – Esforço obtido no modelo simulado com fluência

Modelo3 – Esforço obtido no modelo simulado com retração

Modelo4 – Esforço obtido no modelo simulado com fluência e retração

Quadro B1 – R_V nos Apoios Exteriores [KN]

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	353.6777	731.5053	1132.66	1556.952	2000.359	2457.806
	Modelo2	349.9879	719.3163	1108.398	1517.731	1944.959	2386.618
	Modelo3	306.727	672.642	1062.852	1473.523	1901.844	2344.135
	Modelo4	340.2972	711.9982	1108.172	1528.88	1970.601	2427.666

Quadro B2 – Diferenças em Módulo e % das R_V [KN] nos Apoios Exteriores

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	-3.68981	-12.1891	-24.2622	-39.221	-55.4	-71.1877
	%	-1.04327	-1.6663	-2.14206	-2.51909	-2.7695	-2.89639
Modelo3	Módulo	-46.9507	-58.8634	-69.8079	-83.4292	-98.5146	-113.671
	%	-13.275	-8.04688	-6.16318	-5.35849	-4.92485	-4.62489
Modelo4	Módulo	-13.3805	-19.5071	-24.488	-28.0728	-29.7582	-30.14
	%	-3.78325	-2.66671	-2.16199	-1.80306	-1.48764	-1.2263

Quadro B3 – RV nos Apoios Interiores [KN]

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	741.6446	1434.989	2081.68	2682.095	3244.282	3778.388
	Modelo2	749.0242	1459.367	2130.204	2760.537	3355.082	3920.764
	Modelo3	835.5461	1552.716	2221.295	2848.954	3441.311	4005.73
	Modelo4	768.4057	1474.004	2130.655	2738.241	3303.798	3838.668

Quadro B4 – Diferenças em Módulo e % das RV [KN] nos Apoios Interiores

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	7.379626	24.37816	48.52442	78.44208	110.8	142.3754
	%	0.995035	1.698839	2.331023	2.924657	3.415238	3.768153
Modelo3	Módulo	93.90145	117.7268	139.6158	166.8583	197.0293	227.3418
	%	12.66125	8.204017	6.706882	6.221193	6.073124	6.0169
Modelo4	Módulo	26.76104	39.01419	48.97592	56.14558	59.51634	60.27996
	%	3.608337	2.718779	2.352712	2.093348	1.8345	1.595388

Quadro B5 – M_y [KN.m] nos Apoios Exteriores

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	22.68298	24.67315	25.22102	25.60981	25.87203	26.04126
	Modelo2	29.35101	30.18886	30.48777	30.76535	30.9838	31.14243
	Modelo3	-76.5636	-102.172	-102.879	-102.448	-102.089	-101.819
	Modelo4	-8.73962	-19.6415	-19.5123	-19.6267	-19.658	-19.6452

Quadro B6 – Diferenças em Módulo e % dos M_y [KN.m] nos Apoios Exteriores

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	6.668027	5.515708	5.266748	5.155535	5.111774	5.101167
	%	29.39661	22.3551	20.88238	20.13109	19.75791	19.58878
Modelo3	Módulo	-99.2466	-126.845	-128.1	-128.058	-127.961	-127.86
	%	-437.538	-514.1	-507.908	-500.033	-494.59	-490.992
Modelo4	Módulo	-31.4226	-44.3146	-44.7333	-45.2365	-45.53	-45.6864
	%	-138.529	-179.607	-177.365	-176.638	-175.982	-175.439

Quadro B7 – a_{\max} [mm] na Viga do 1º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	-1.14344	-1.37992	-1.59277	-1.79996	-2.0026	-2.20189
	Modelo2	-1.81546	-2.30178	-2.71766	-3.10527	-3.47467	-3.83097
	Modelo3	-2.45547	-2.70247	-2.91483	-3.12524	-3.33147	-3.53437
	Modelo4	-3.42646	-4.43945	-4.96468	-5.49854	-6.02364	-6.53955

Quadro B8 – Diferenças em Módulo e % do a_{\max} [mm] na Viga do 1º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	-0.67202	-0.92185	-1.12489	-1.3053	-1.47207	-1.62908
	%	58.77123	66.8045	70.62496	72.51849	73.50825	73.9857
Modelo3	Módulo	-1.31203	-1.32254	-1.32206	-1.32528	-1.32888	-1.33249
	%	114.7435	95.84163	83.0039	73.62831	66.3576	60.5157
Modelo4	Módulo	-2.28302	-3.05952	-3.37192	-3.69858	-4.02104	-4.33767
	%	199.662	221.7167	211.7015	205.4813	200.7913	196.9977

Quadro B9 – a_{\max} [mm] na Viga do 2º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	-1.38169	-1.68476	-2.10875	-2.52351	-2.92904	-3.32779
	Modelo2	-1.76966	-2.60289	-3.37284	-4.10193	-4.80482	-5.48853
	Modelo3	-1.8643	-3.72499	-4.18883	-4.61248	-5.02545	-5.43153
	Modelo4	-2.54447	-5.47122	-6.78954	-7.86595	-8.91771	-9.95029

Quadro B10 – Diferenças em Módulo e % do a_{\max} [mm] na Viga do 2º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	-0.38797	-0.91813	-1.2641	-1.57842	-1.87578	-2.16074
	%	28.07944	54.49624	59.94534	62.54875	64.0406	64.93025
Modelo3	Módulo	-0.48262	-2.04023	-2.08008	-2.08897	-2.09641	-2.10374
	%	34.92964	121.0991	98.64066	82.78043	71.57318	63.21738
Modelo4	Módulo	-1.16278	-3.78646	-4.68079	-5.34244	-5.98867	-6.6225
	%	84.15691	224.7476	221.9701	211.7069	204.4585	199.0062

Quadro B11 – τ_{xz} [KPa] nas Vigas do 1º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	250.833	170.2794	185.7609	197.604	205.5936	210.7499
	Modelo2	128.4853	99.63495	124.3788	143.3978	157.6498	168.2901
	Modelo3	-259.837	423.3062	454.2265	469.6864	480.7745	488.9926
	Modelo4	84.12715	281.9351	303.0739	318.5439	328.2662	334.254

Quadro B12 – Diferenças em Módulo e % do τ_{xz} [KPa] nas Vigas do 1º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	-122.348	-70.6445	-61.3821	-54.2063	-47.9438	-42.4597
	%	-48.7766	-41.4874	-33.0436	-27.4318	-23.3197	-20.147
Modelo3	Módulo	-510.67	253.0267	268.4657	272.0824	275.181	278.2427
	%	-203.59	148.595	144.5222	137.6907	133.8471	132.0251
Modelo4	Módulo	-166.706	111.6556	117.3131	120.9398	122.6726	123.5041
	%	-66.4609	65.572	63.15274	61.20312	59.66756	58.60222

Quadro B13 – τ_{xz} [KPa] nas Vigas do 2º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	-347.207	93.82876	134.5353	154.8389	168.4814	177.286
	Modelo2	-314.346	59.84196	104.287	132.6258	153.8282	169.5509
	Modelo3	-315.172	-119.97	-20.5596	5.587171	24.46304	38.49209
	Modelo4	-310.79	12.71247	96.21544	118.687	133.4923	142.7472

Quadro B14 – Diferenças em Módulo e % do τ_{xz} [KPa] nas Vigas do 2º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	32.86051	-33.9868	-30.2483	-22.2131	-14.6531	-7.73509
	%	-9.46425	-36.2222	-22.4835	-14.346	-8.69719	-4.36306
Modelo3	Módulo	32.03449	-213.799	-155.095	-149.252	-144.018	-138.794
	%	-9.22634	-227.86	-115.282	-96.3916	-85.4803	-78.2881
Modelo4	Módulo	36.41655	-81.1163	-38.3199	-36.1519	-34.9891	-34.5388
	%	-10.4884	-86.4514	-28.4831	-23.3481	-20.7674	-19.482

Quadro B15 – σ_x nas fibras superiores das vigas do 1º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	-3456.32	-3601.42	-3623.88	-3639.16	-3649.47	-3656.12
	Modelo2	-3607.81	-3691.52	-3706.38	-3718.9	-3728.66	-3735.83
	Modelo3	-4450.31	-3619.32	-3622.97	-3640.59	-3654.74	-3665.33
	Modelo4	-3737.67	-3568.29	-3581.5	-3595.5	-3605.51	-3611.93

Quadro B16 – Diferenças em Módulo e % do σ_x nas fibras superiores das vigas do 1º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	-151.482	-90.0913	-82.5017	-79.7366	-79.19	-79.7105
	%	4.382751	2.501546	2.276613	2.191071	2.169905	2.180196
Modelo3	Módulo	-993.985	-17.8998	0.912074	-1.42455	-5.27556	-9.21524
	%	28.75844	0.497021	-0.02517	0.039145	0.144557	0.25205
Modelo4	Módulo	-281.348	33.13882	42.37708	43.66607	43.95897	44.18438
	%	8.140099	-0.92016	-1.16938	-1.19989	-1.20453	-1.20851

Quadro B17 – σ_x nas fibras superiores das vigas do 2º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	-4198.91	-3738.32	-3772.32	-3806.83	-3830.15	-3845.21
	Modelo2	-4157.81	-3796.08	-3831.42	-3867.57	-3895.52	-3916.31
	Modelo3	-4417.89	-4069.6	-4005.33	-4045.61	-4077.73	-4101.71
	Modelo4	-4170.38	-3844.76	-3824.5	-3859.63	-3883.43	-3898.61

Quadro B18 – Diferenças em Módulo e % do σ_x nas fibras superiores das vigas do 2º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	41.09777	-57.7562	-59.0989	-60.7481	-65.3695	-71.1064
	%	-0.97877	1.544978	1.566648	1.595767	1.706706	1.84922
Modelo3	Módulo	-218.983	-331.274	-233.009	-238.782	-247.576	-256.5
	%	5.21524	8.861567	6.176808	6.27248	6.463864	6.670637
Modelo4	Módulo	28.5273	-106.434	-52.1829	-52.8074	-53.2744	-53.3995
	%	-0.6794	2.847109	1.38331	1.387178	1.39092	1.388729

Quadro B19 – σ_x nas fibras inferiores das vigas do 1º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	3827.941	3814.195	3845.364	3868.202	3883.606	3893.548
	Modelo2	3799.723	3802.302	3835.602	3862.52	3883.054	3898.325
	Modelo3	4689.235	4797.981	4821.745	4849.746	4871.014	4886.852
	Modelo4	4048.103	4149.191	4168.466	4196.035	4214.388	4225.778

Quadro B20 – Diferenças em Módulo e % do σ_x nas fibras inferiores das vigas do 1º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	-28.2182	-11.8932	-9.76219	-5.68152	-0.55235	4.77694
	%	-0.73716	-0.31181	-0.25387	-0.14688	-0.01422	0.122689
Modelo3	Módulo	861.2939	983.7856	976.3811	981.5442	987.4076	993.304
	%	22.50019	25.79274	25.39112	25.37469	25.42502	25.51154
Modelo4	Módulo	220.1625	334.9961	323.1017	327.8331	330.7824	332.2308
	%	5.751461	8.782877	8.402371	8.475078	8.517402	8.532855

Quadro B21 – σ_x nas fibras inferiores das vigas do 2º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	3576.75	3711.81	3778.953	3821.832	3850.715	3869.356
	Modelo2	3634.779	3781.234	3841.958	3888.421	3924.088	3950.586
	Modelo3	4340.359	3769.837	3750.867	3801.508	3841.253	3870.941
	Modelo4	3717.354	3703.758	3740.194	3782.041	3811.227	3829.878

Quadro B22 – Diferenças em Módulo e % do σ_x nas fibras inferiores das vigas do 2º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	58.02939	69.4235	63.00537	66.5891	73.3731	81.22976
	%	1.622406	1.870341	1.66727	1.742335	1.905441	2.09931
Modelo3	Módulo	763.6097	58.0261	-28.0861	-20.3235	-9.46174	1.585665
	%	21.34926	1.563283	-0.74322	-0.53177	-0.24571	0.04098
Modelo4	Módulo	140.6045	-8.0526	-38.7591	-39.7908	-39.4876	-39.4781
	%	3.931069	-0.21695	-1.02566	-1.04115	-1.02546	-1.02028

PARTE C

Modelo1 – Esforço obtido no modelo simulado apenas com um incremento

Modelo2 – Esforço obtido no modelo simulado com fluência e retração

Modelo3 – Esforço obtido no modelo simulado com fluência e retração e com armaduras

Quadro C1 – R_V nos Apoios Exteriores [KN]

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	353.6777	731.5053	1132.66	1556.952	2000.359	2457.806
	Modelo2	340.2972	711.9982	1108.172	1528.88	1970.601	2427.666
	Modelo3	332.6025	701.3944	1099.652	1526.115	1975.009	2439.072

Quadro C2 – Diferenças em Módulo e % das R_V [KN] nos Apoios Exteriores

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	-13.3805	-19.5071	-24.488	-28.0728	-29.7582	-30.14
	%	-3.78325	-2.66671	-2.16199	-1.80306	-1.48764	-1.2263
Modelo3	Módulo	-21.0752	-30.111	-33.0085	-30.8371	-25.3499	-18.7336
	%	-5.95888	-4.1163	-2.91425	-1.98061	-1.26727	-0.76221

Quadro C3 – R_V nos Apoios Interiores [KN]

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	741.6446	1434.989	2081.68	2682.095	3244.282	3778.388
	Modelo2	768.4057	1474.004	2130.655	2738.241	3303.798	3838.668
	Modelo3	784.506	1496.633	2149.829	2746.613	3298.536	3820.121

Quadro C4 – Diferenças em Módulo e % das R_V [KN] nos Apoios Interiores

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	26.76104	39.01419	48.97592	56.14558	59.51634	60.27996
	%	3.608337	2.718779	2.352712	2.093348	1.8345	1.595388
Modelo3	Módulo	42.8614	61.64377	68.14982	64.51793	54.25432	41.7327
	%	5.779236	4.295765	3.27379	2.405505	1.672306	1.104511

Quadro C5 – M_y [KN.m] nos Apoios Exteriores

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	22.68298	24.67315	25.22102	25.60981	25.87203	26.04126
	Modelo2	-8.73962	-19.6415	-19.5123	-19.6267	-19.658	-19.6452
	Modelo3	-3.55476	-13.6474	-13.2316	-13.2932	-13.3177	-13.3173

Quadro C6 – Diferenças em Módulo e % dos M_y [KN.m] nos Apoios Exteriores

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	-31.4226	-44.3146	-44.7333	-45.2365	-45.53	-45.6864
	%	-138.529	-179.607	-177.365	-176.638	-175.982	-175.439
Modelo3	Módulo	-26.2377	-38.3205	-38.4526	-38.903	-39.1897	-39.3586
	%	-115.671	-155.313	-152.463	-151.907	-151.475	-151.139

Quadro C7 – a_{\max} [mm] na Viga do 1º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	-1.14344	-1.37992	-1.59277	-1.79996	-2.0026	-2.20189
	Modelo2	-3.42646	-4.43945	-4.96468	-5.49854	-6.02364	-6.53955
	Modelo3	-3.15229	-4.03297	-4.56065	-5.0938	-5.61619	-6.12877

Quadro C8 – Diferenças em Módulo e % do a_{\max} [mm] na Viga do 1º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	-2.28302	-3.05952	-3.37192	-3.69858	-4.02104	-4.33767
	%	58.77123	66.8045	70.62496	72.51849	73.50825	73.9857
Modelo3	Módulo	-2.00885	-2.65305	-2.96788	-3.29384	-3.6136	-3.92688
	%	114.7435	95.84163	83.0039	73.62831	66.3576	60.5157

Quadro C9 – a_{\max} [mm] na Viga do 2º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	-1.38169	-1.68476	-2.10875	-2.52351	-2.92904	-3.32779
	Modelo2	-2.54447	-5.47122	-6.78954	-7.86595	-8.91771	-9.95029
	Modelo3	-2.4	-5.16445	-6.44261	-7.51804	-8.5647	-9.59062

Quadro C10 – Diferenças em Módulo e % do a_{\max} [mm] na Viga do 2º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	-1.16278	-3.78646	-4.68079	-5.34244	-5.98867	-6.6225
	%	28.07944	54.49624	59.94534	62.54875	64.0406	64.93025
Modelo3	Módulo	-1.01831	-3.47969	-4.33386	-4.99453	-5.63566	-6.26283
	%	34.92964	121.0991	98.64066	82.78043	71.57318	63.21738

Quadro C11 – τ_{xz} [KPa] nas Vigas do 1º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	250.833	170.2794	185.7609	197.604	205.5936	210.7499
	Modelo2	84.12715	281.9351	303.0739	318.5439	328.2662	334.254
	Modelo3	496.7644	736.9466	781.6836	804.0959	816.8884	824.2632

Quadro C12 – Diferenças em Módulo e % do τ_{xz} [KPa] nas Vigas do 1º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	-166.706	111.6556	117.3131	120.9398	122.6726	123.5041
	%	-66.4609	65.572	63.15274	61.20312	59.66756	58.60222
Modelo3	Módulo	245.9313	566.6672	595.9227	606.4918	611.2948	613.5133
	%	98.04584	332.7866	320.801	306.9228	297.3317	291.1097

Quadro C13 – τ_{xz} [KPa] nas Vigas do 2º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	-347.207	93.82876	134.5353	154.8389	168.4814	177.286
	Modelo2	-310.79	12.71247	96.21544	118.687	133.4923	142.7472
	Modelo3	105.7333	575.0696	724.6841	764.9681	787.492	800.5009

Quadro C14 – Diferenças em Módulo e % do τ_{xz} [KPa] nas Vigas do 2º Piso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	36.41655	-81.1163	-38.3199	-36.1519	-34.9891	-34.5388
	%	-10.4884	-86.4514	-28.4831	-23.3481	-20.7674	-19.482
Modelo3	Módulo	452.9401	481.2408	590.1488	610.1292	619.0107	623.2149
	%	-130.453	512.8926	438.6572	394.0412	367.406	351.5308

Quadro C15 – σ_x nas fibras superiores das vigas do 1ºPiso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	-3456.32	-3601.42	-3623.88	-3639.16	-3649.47	-3656.12
	Modelo2	-3737.67	-3568.29	-3581.5	-3595.5	-3605.51	-3611.93
	Modelo3	-2873.41	-2673.23	-2687.84	-2704.31	-2715.32	-2721.74

Quadro C16 – Diferenças em Módulo e % do σ_x nas fibras superiores das vigas do 1ºPiso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	-281.348	33.13882	42.37708	43.66607	43.95897	44.18438
	%	8.140099	-0.92016	-1.16938	-1.19989	-1.20453	-1.20851
Modelo3	Módulo	582.9098	928.1914	936.0449	934.8522	934.1475	934.3802
	%	-16.865	-25.7729	-25.8299	-25.6887	-25.5968	-25.5566

Quadro C17 – σ_x nas fibras superiores das vigas do 2ºPiso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	-4198.91	-3738.32	-3772.32	-3806.83	-3830.15	-3845.21
	Modelo2	-4170.38	-3844.76	-3824.5	-3859.63	-3883.43	-3898.61
	Modelo3	-3362.08	-2921.18	-2878.55	-2917.9	-2943.8	-2958.96

Quadro C18 – Diferenças em Módulo e % do σ_x nas fibras superiores das vigas do 2ºPiso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	28.5273	-106.434	-52.1829	-52.8074	-53.2744	-53.3995
	%	-0.6794	2.847109	1.38331	1.387178	1.39092	1.388729
Modelo3	Módulo	836.8245	817.1436	893.7644	888.9214	886.3499	886.2526
	%	-19.9296	-21.8586	-23.6927	-23.3507	-23.1414	-23.0482

Quadro C19 – σ_x nas fibras inferiores das vigas do

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	3827.941	3814.195	3845.364	3868.202	3883.606	3893.548
	Modelo2	4048.103	4149.191	4168.466	4196.035	4214.388	4225.778
	Modelo3	3673.277	3595.067	3608.699	3632.651	3646.94	3654.77

Quadro C20 – Diferenças em Módulo e % do σ_x nas fibras inferiores das vigas do 1ºPiso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	220.1625	334.9961	323.1017	327.8331	330.7824	332.2308
	%	5.751461	8.782877	8.402371	8.475078	8.517402	8.532855
Modelo3	Módulo	-154.664	-219.128	-236.665	-235.551	-236.666	-238.778
	%	-4.0404	-5.74506	-6.15455	-6.08943	-6.09398	-6.13266

Quadro C21 – σ_x nas fibras inferiores das vigas do 2ºPiso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
2D	Modelo1	3576.75	3711.81	3778.953	3821.832	3850.715	3869.356
	Modelo2	3717.354	3703.758	3740.194	3782.041	3811.227	3829.878
	Modelo3	3463.187	3325.189	3305.617	3340.074	3360.845	3372.279

Quadro C22 – Diferenças em Módulo e % do σ_x nas fibras inferiores das vigas do 2ºPiso

Tipo de Modelo\ N° Pisos		2	4	6	8	10	12
Modelo2	Módulo	140.6045	-8.0526	-38.7591	-39.7908	-39.4876	-39.4781
	%	3.931069	-0.21695	-1.02566	-1.04115	-1.02546	-1.02028
Modelo3	Módulo	-113.563	-386.621	-473.336	-481.758	-489.87	-497.076
	%	-3.17503	-10.416	-12.5256	-12.6054	-12.7215	-12.8465